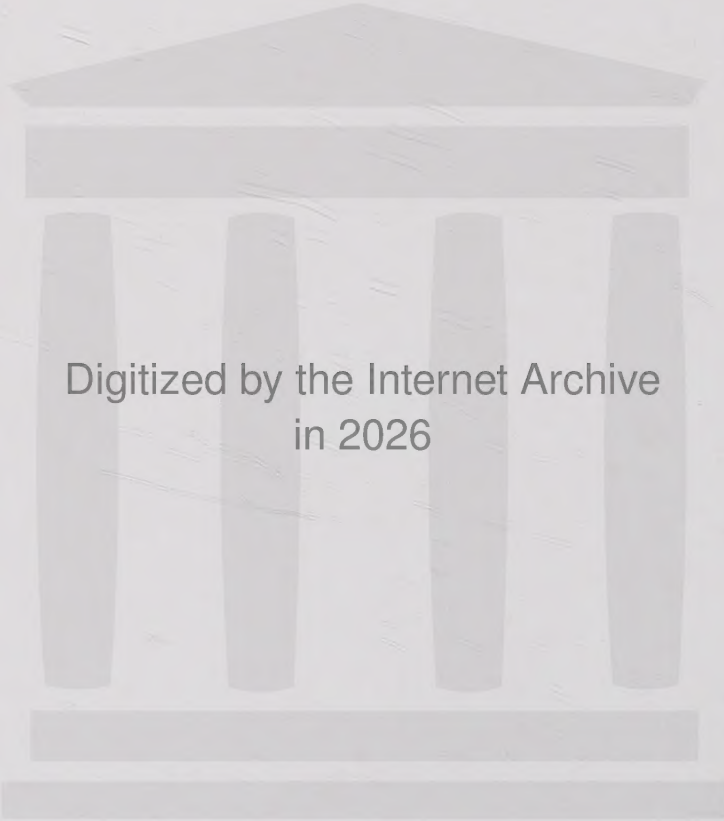


VERGLEICH EINIGER EIGENSCHAFTEN
VERSCHIEDENER
RÖNTGENVERSTÄRKERFOLIEN
UNTER BENUTZUNG DES PHANTOMS
DER DEUTSCHEN
RÖNTGEN-GESELLSCHAFT

Rudolf Lorenz

Diss.
München
1984



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554009_0015

Aus der Radiologischen Klinik und Poliklinik
der Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. J. Lissner

VERGLEICH EINIGER EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER
RÖNTGENVERSTÄRKERFOLIEN UNTER BENUTZUNG DES
PHANTOMS DER DEUTSCHEN RÖNTGEN-GESELLSCHAFT

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde
an der Ludwig Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Rudolf Lorenz

aus München

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter : Prof. Dr. J. Lissner
Dekan : Prof. Dr. W. Spann
Tag der mündlichen Prüfung : 08. November 1984

GLIEDERUNG

1. Ziel_der_Untersuchung:
Die vergleichende Untersuchung verschiedener Röntgenfilm-Verstärkerfolien-Kombinationen unter Benutzung eines von der Deutschen Röntgen-Gesellschaft entwickelten Phantoms

2. Theoretische_und_praktische_Grundlagen_
der_Röntgenphotographie:
 - 2.1. Röntgenbilderzeugung mit Hilfe von Film-Folien-Systemen
 - 2.1.1. - Die Entstehung einer Röntgenaufnahme
 - 2.1.1.1. - Der Weg der Röntgenstrahlung
 - 2.1.1.2. - Die Umwandlung der Schwächungsunterschiede für Röntgenstrahlen im Aufnahmeobjekt in Schwärzungsunterschiede im fertigen Röntgenbild
 - 2.1.2. - Technische Faktoren, die die Qualität einer Röntgenaufnahme beeinflussen:
 - 2.1.2.1. - Die Strahlenquelle
 - 2.1.2.1.1. - Erzeugung der Röntgenstrahlung
 - 2.1.2.1.2. - Eigenschaften der Röntgenstrahlen
 - 2.1.2.1.3. - Röhrenspannung
 - 2.1.2.1.4. - Röhrenstrom
 - 2.1.2.1.5. - Schaltzeit der Röntgenröhre
 - 2.1.2.1.6. - Röhrenfokus

II

- 2.1.2.1.7. - Tiefenblende
- 2.1.2.1.8. - Abstand Röhrenfokus-Aufnahmeobjekt
- 2.1.2.2. - Das Aufnahmeobjekt
 - 2.1.2.2.1. - Atomarer und molekularer Aufbau
 - 2.1.2.2.2. - Dicke und Dichte
 - 2.1.2.2.3. - Bewegung des Objekts
- 2.1.2.3. - Das Streustrahlenraster
 - 2.1.2.3.1. - Zentrierung des Aufnahmesystems
 - 2.1.2.3.2. - Fokussierung des Aufnahmesystems
- 2.1.2.4. - Die Kassette
- 2.1.2.5. - Der Röntgenfilm
- 2.1.2.6. - Die Verstärkerfolien
- 2.2. Die Bedeutung der Verstärkerfolien
 - 2.2.1. - Geschichtliches zur Entwicklung
 - 2.2.2. - Aufbau einer Verstärkerfolie
 - 2.2.3. - Faktoren, die die Eigenschaften einer Verstärkerfolie bestimmen:
 - 2.2.3.1. - Art der verwendeten Leuchtstoffkristalle
 - 2.2.3.1.1. - Chemische Eigenschaften
 - 2.2.3.1.2. - Physikalische Eigenschaften
 - 2.2.3.2. - Korngröße der Leuchtkristalle
 - Die Bedeutung der Größe des vom einzelnen Leuchtkristall im Film geschwärzten Areals
 - 2.2.3.3. - Belegungsdichte der Folie mit Leuchtkristallen:
 - Verschiedene Arten von Verstärkerfolien in Bezug auf ihre Lichtausbeute

III

- 2.2.3.4. - Das Bindemittel, in das die
Leuchtkristalle eingebettet sind:
- 2.2.3.4.1. - Farbe des Bindemittels
- 2.2.3.4.2. - Mengenverhältnis Bindemittel - Kristalle
- 2.2.3.5. - Die Haftschicht
- 2.2.3.6. - Die Schutzschicht
- 2.3. Die wichtigsten Ursachen der Unschärfe
im Röntgenbild:
- 2.3.1. - Bewegungsunschärfe
- 2.3.2. - Geometrische Unschärfe
- 2.3.3. - Materialunschärfe der Film-Folien-Komb.
- 2.3.4. - Quantennatur der Röntgenstrahlung
- 2.4. Verschiedene Verfahren des Qualitätsvergleichs
von Film-Folien-Systemen:
- 2.4.1. - Merkmale, in denen sich die einzelnen
Verfahren unterscheiden:
- 2.4.1.1. - Normierung des abzubildenden Objekts
- 2.4.1.2. - Auswertung des fertigen Röntgenbildes:
 - 2.4.1.2.1. - durch das menschliche Auge
 - 2.4.1.2.2. - mit Hilfe des Mikrodensitometers
- 2.4.2. - Subjektives Verfahren:
- 2.4.2.1. - Auswertung des Röntgenbildes durch
das menschliche Auge
- 2.4.2.2. - Abzubildende Objekte nicht normiert
- 2.4.3. - Halbobjektives Verfahren:
- 2.4.3.1. - Auswertung des Röntgenbildes durch
das menschliche Auge

IV

- 2.4.3.2. - Normierung der abzubildenden Objekte:
 - Bohrungen von abnehmendem Durchmesser in Testkörpern
 - Bleistrichraster
- 2.4.4. - Objektive Verfahren:
- 2.4.4.1. - Auswertung des Röntgenbildes durch das Mikrodensitometer
- 2.4.4.2. - Normierung der abzubildenden Objekte:
- 2.4.4.2.1. - Messung des Auflösungsvermögens mittels Bleistrichraster
 (- Modulationsübertragungsfunktion)
- 2.4.4.2.2. - Messung von Bildkontrast und Bildschärfe mittels scharfer Kanten und schmaler Spalte
- 2.4.4.2.3. - Messung des Rauschens an homogen belichteten Röntgenfilmen
 - Ein Versuch der Begriffsdefinition des Rauschens
- 2.4.4.2.3.1. - Die wichtigsten Ursachen des Rauschens:
 - Filmkörnigkeit
 - Folienkörnigkeit
 - Röntgenquanten-Verteilung

3. Methode der Film-Folien-Untersuchung

- 3.1. - Verwendete Materialien und Geräte:
- 3.1.1. - Materialien:
- 3.1.1.1. - Röntgen-Verstärkerfolien

- 3.1.1.2. - Röntgenfilme
- 3.1.1.3. - Untersuchte Film-Folien-Kombinationen
- 3.1.2. - Geräte:
 - 3.1.2.1. - Röntgeneinrichtung
 - 3.1.2.1.1. - Röntgenstrahler
 - 3.1.2.1.2. - Röntgengenerator
 - 3.1.2.1.3. - Streustrahlenraster
 - 3.1.2.1.4. - Kassetten
 - 3.1.2.1.5. - Entwicklungsmaschine
 - 3.1.2.2. - Beschreibung des Aufnahmeobjekts
 - 3.1.2.3. - Densitometer
 - 3.1.2.4. - Elektronischer Rechner
- 3.2. - Untersuchungsanordnung zur Belichtung der Filme
- 3.3. - Untersuchungsdurchführung
- 3.4. - Meßwerte
 - 3.4.1. - mAs-Produkt
 - 3.4.2. - Dosis
 - 3.4.3. - Flächendosisprodukt
 - 3.4.4. - Auflösungsvermögen
- 3.5. - Ergebnisse:
 - 3.5.1. - Aus den Meßwerten abgeleitete Ergebnisse:
 - 3.5.1.1. - Abhängigkeit des mAs-Produkts von der verwendeten Film-Folien-Kombination und von der Röhrenspannung
 - 3.5.1.2. - Abhängigkeit der gemessenen Oberflächen-dosis von der verwendeten Film-Folien-Kombination und von der Röhrenspannung

VI

- 3.5.1.3. - Abhängigkeit des Flächendosisprodukts
 von der verwendeten Film-Folien-
 Kombination und von der Röhrenspannung
- 3.5.1.4. - Abhängigkeit des Auflösungsvermögens
 von der verwendeten Film-Folien-
 Kombination und von der Röhrenspannung
- 3.5.1.5. - Abhängigkeit des Schwärzungsverlaufs
 von der verwendeten Film-Folien-
 Kombination, von der Röhrenspannung
 und von der Materialstärke eines
 Aluminium-Keils
- 3.5.2. - Versuch der Messung des Rauschens mit
 Hilfe eines objektiven Verfahrens:
- 3.5.2.1. - Die Standardabweichung im Mikrodensito-
 gramm:
- 3.5.2.1.1. - Theoretische Überlegungen
- 3.5.2.1.2. - Praktische Durchführung der Messungen
- 3.5.2.1.2.1. - Bestimmung der optimalen Meßfläche
 des Densitometers
- 3.5.2.1.2.2. - Abhängigkeit der Standardabweichung
 von der Schwärzung
- 3.5.2.1.2.3. - Anfertigen der Mikrodensitogramme
- 3.5.2.1.2.4. - Auswertung der Mikrodensitogramme
 mit Hilfe eines Rechners
- 3.5.2.2. - Ergebnisse dieser Messungen

- 4. Diskussion
- 4.1. - Ziel der Untersuchung
- 4.2. - Röntgenbilderzeugung mit Hilfe von
 Film-Folien-Systemen
- 4.3. - Eigenschaften der Verstärkerfolien
- 4.4. - Ursachen der Unschärfe
- 4.5. - Verfahren der Qualitätsbeurteilung
 von Abbildungssystemen
- 4.6. - Methode der Film-Folien-Untersuchung
- 4.6.1. - Untersuchungsanordnung
- 4.6.2. - Untersuchungsdurchführung
- 4.7. - Ergebnisse der Messungen, die bei der
 Belichtung der Filme durchgeführt wurden
- 4.8. - Ergebnis des Auflösungstests
- 4.9. - Ergebnis der Kontrastuntersuchungen
 am Aluminium-Keil
- 4.10. - Versuch der Messung des Rauschens mit
 Hilfe eines objektiven Verfahrens
- 4.10.1. - Theoretische Grundlagen
- 4.10.2. - Praktische Durchführung der Messungen
- 4.10.3. - Ergebnisse dieser Messungen

- 5. Zusammenfassung

VERGLEICH EINIGER EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER
RÖNTGENVERSTÄRKERFOLIEN UNTER BENUTZUNG DES
PHANTOMS DER DEUTSCHEN RÖNTGEN-GESELLSCHAFT

1. Ziel der Untersuchung:

Das Ziel einer röntgenologischen Untersuchung ist es, mit möglichst geringem technischen und finanziellen Aufwand bei gleichzeitiger geringster Belastung des Patienten und des untersuchenden Personals eine optimale Beantwortung der röntgenologisch beantwortbaren Fragestellungen zu erreichen.

Neben einem soliden röntgenologisch-technischen und medizinischen Wissen des Untersuchers ist eine gute Röntgenbildqualität die wesentliche Voraussetzung zur diagnostischen Röntgenbildbeurteilung. Die Qualität der Röntgenaufnahme wird einerseits durch den Patienten und den Untersuchenden, andererseits durch die vorhandene Röntgengerätetechnik, durch das Film-Folien-Kassetten- und durch das Entwicklungssystem beeinflusst.

Entscheidende Bedeutung für die Höhe der Strahlenbelastung des Patienten besitzen die Eigenschaften der Röntgenfilm-Verstärkerfolien-Kombination.

Seit einiger Zeit werden von verschiedenen Herstellern Röntgenverstärkerfolien angeboten, welche statt Kalziumwolframat (CaWO_4) die Verbindungen seltener Erden (SE) als Leuchtstoffe enthalten. Als "seltene Erden" wird eine

Gruppe von Elementen des Periodensystems bezeichnet, der z.B. Lanthan, Gadolinium, Yttrium und Terbium angehören.

In der Praxis herrscht immer noch eine gewisse Unsicherheit über die Anwendungsmöglichkeiten und die physikalischen Eigenschaften der SE-Folien im klinischen Routinebetrieb.

Das Ziel der dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen war es, einige physikalische Eigenschaften verschiedener auf dem deutschen Markt erhältlicher Röntgen-Verstärkerfolien zu beschreiben und - soweit möglich - diese Eigenschaften der Folien untereinander zu vergleichen.

Zur Anfertigung der für die Untersuchung der Folien notwendigen Röntgenaufnahmen stand ein von der Deutschen Röntgen-Gesellschaft für die Qualitätssicherung entwickeltes Phantom zur Verfügung.

2. Theoretische und praktische Grundlagen der Röntgenphotographie:

2.1. Röntgenbilderzeugung mit Hilfe von Film-Folien-Systemen:

Neben verschiedenen anderen Verfahren wie z.B. Schirmbildphotographie, Röntgenbildverstärkerphotographie und Computertomographie ist die Methode der Bilderzeugung mit Hilfe von Film-Folien-Systemen nach wie vor eine der wichtigsten Grundlagen der Röntgendiagnostik.

2.1.1. Die Entstehung einer Röntgenaufnahme:

Ein Röntgengenerator gibt an eine Röntgenröhre elektrische Energie ab, die diese Röhre teilweise in Röntgenstrahlen umwandelt. Das aus der Röhre austretende Nutzstrahlenbündel durchdringt die zwischen der Röhre und dem Aufnahmeobjekt liegende Luftschicht und trifft auf die Oberfläche des Aufnahmeobjekts, in der Regel die Hautoberfläche des Patienten. Im Aufnahmeobjekt kommt es zu Wechselwirkungen zwischen der Strahlung und der Materie des Objekts in der Art und Weise, daß die hinter dem Aufnahmeobjekt austretende Röntgenstrahlung ein "Strahlenbild" des Objekts darstellt. Nach dem Durchtritt durch ein sogenanntes Streustrahlenraster trifft die Röntgenstrahlung auf das Bildaufzeichnungssystem: In einer lichtdicht schließenden Aluminiumkassette liegt zwischen zwei Verstärkerfolien der licht- und röntgenstrahlenempfindliche Film (Abb. 1).

2.1.1.2. Die Umwandlung der Schwächungsunterschiede für Röntgenstrahlen im Aufnahmeobjekt in Schwärzungsunterschiede im fertigen Röntgenbild:

Da die einzelnen Details des Aufnahmeobjekts auf Grund ihrer unterschiedlichen atomaren Struktur unterschiedliche Wechselwirkungen mit der einfallenden Röntgenstrahlung eingehen, resultiert hinter dem Objekt je nach Art des durchdrungenen Objektdetails eine mehr oder minder geschwächte Strahlung.

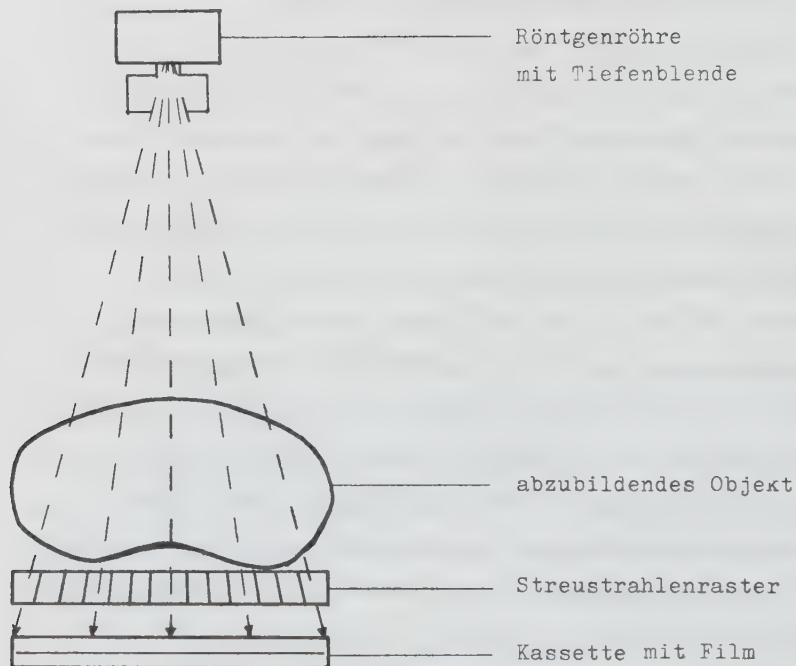


Abb. 1 Der Weg der Röntgenstrahlung von der Röhre bis zum Bildaufzeichnungssystem

Dies gilt jedoch nur für den Fall eines inhomogenen Objekts, wie es der menschliche Körper darstellt. Handelt es sich um ein homogenes Aufnahmeobjekt, so resultiert dahinter eine gleichmäßig geschwächte Strahlung.

Die Aufgabe des Bildaufzeichnungssystems (im beschriebenen Fall versteht man darunter die Kassette mit den beiden Verstärkerfolien und dem Film) ist es, die Schwächungs-

unterschiede, die die Details des Untersuchungsobjekts für die Röntgenstrahlung darstellen, in Schwärzungsunterschiede im fertigen Röntgenbild zu überführen.

Bei der Betrachtung des entwickelten Röntgenfilms im durchfallenden Licht müssen diese Schwärzungsunterschiede für den geübten Radiologen Rückschlüsse auf die Details des untersuchten Gegenstandes zulassen.

2.1.2. Technische Faktoren, die die Qualität einer Röntgenaufnahme beeinflussen:

2.1.2.1. Die Strahlenquelle:

Die Einrichtung zur Erzeugung der Röntgenstrahlung besteht im wesentlichen aus drei Teilen:

- Generator
- Schaltpult
- Röntgenstrahler

Der Röntgengenerator liefert die zum Betrieb der Röntgenröhre notwendige Hochspannung und ist über das Schaltpult mit der Röhre verbunden. Das Schaltpult befindet sich in einem Raum, in dem das Bedienungspersonal vor der Röntgenstrahlung geschützt ist.

Es ermöglicht die Wahl der Höhe der an die Röhre angelegten Spannung, die Wahl der Schaltzeit der Röhre und die Wahl der Stärke des die Röhre durchfliessenden Stroms.

Der Röntgenstrahler besteht aus der Röntgenröhre und einem Gehäuse, das die Strahlung nur in einem eng begrenzten Bereich austreten läßt. Der Raum zwischen Röhre und Gehäuse ist zur Isolation und zur Kühlung mit Öl gefüllt. Die Röntgenröhre ist ein Vakuumgefäß, in dem sich zwei Elektroden gegenüberliegen.

2.1.2.1.1. Erzeugung der Röntgenstrahlung

Legt man an die beiden Elektroden der Röntgenröhre eine ausreichend hohe Spannung an, so treten aus der Kathode Elektronen aus, die zwischen den beiden Elektroden beschleunigt werden, um dann auf das Anodenmaterial zu treffen. Ein hoher Prozentsatz der bei diesem Aufprall freiwerdenden Energie wird in Wärme umgewandelt, die durch Kühlung der Anode abgeleitet werden muß. Um ein Schmelzen der Anode zu verhindern, werden zu ihrer Herstellung Materialien mit sehr hohem Schmelzpunkt (meist Wolfram) verwendet.

Ein Teil der Aufprallenergie der Elektronen - nach Angerstein (1) unter 1% - wird in den Atomhüllen des Anodenmaterials in eine Photonenstrahlung umgewandelt, die nach ihrem Entdecker Wilhelm Conrad Röntgen als "Röntgenstrahlung" bezeichnet wird.

2.1.2.1.2. Eigenschaften der Röntgenstrahlen

Die Röntgenstrahlung ist eine elektromagnetische Wellenstrahlung wie z.B. Licht. Der kleinste denkbare Bestand-

teil der Röntgenstrahlung ist ein Quant. Er wird im Falle des Lichts auch als Photon bezeichnet und stellt ein Teilchen dar, das keine Masse, wohl aber eine Energie und einen Impuls besitzt. Die verschiedenen elektromagnetischen Wellenstrahlungen unterscheiden sich in der Energiemenge, die das einzelne Quant besitzt. Diese Energie wiederum ist umgekehrt proportional der Wellenlänge und direkt proportional der Frequenz der Strahlung.

In der Röntgenröhre entsteht Strahlung, deren Quanten nicht alle die gleiche Energie aufweisen, sondern deren Energien um einen Mittelwert gestreut liegen. Die höchste Energie, die ein Quant der Röntgenstrahlung besitzen kann, ist durch die Höhe der angelegten Röhrenspannung vorgegeben. Nur wenige Quanten erreichen diesen Wert, der Großteil der Quantenenergien liegt unter diesem Energieniveau.

Die Röntgenstrahlung breitet sich vom Entstehungsort nach allen Richtungen gleichmäßig, geradlinig und im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus.

"Die Röntgenstrahlung ist charakterisiert durch Photonenenergien, die beim Auftreffen auf Materie eine direkte Ionisation durch Stoß ermöglichen" (Zitat aus (1)). Diese Eigenschaft kann zu ihrem Nachweis durch Ionisationskammern verwendet werden.

Röntgenstrahlen sind in der Lage, Materie zu durchdringen und zwar in Abhängigkeit von ihrer Energie, dem atomaren Aufbau und der Dicke der Materie.

Trifft ein Röntgenquant auf Materie, so kann es absorbiert oder gestreut werden, oder es kann auch unbehindert den Stoff durchdringen.

Unter Absorption versteht man, daß das Quant seine Energie vollständig an das durchstrahlte Material abgibt (Photoeffekt)(37).

Wird ein Röntgenquant gestreut, so bedeutet dies, daß es seine Richtung verändert. Diese Richtungsänderung kann ohne Energieverlust erfolgen (klassische Streuung)(37), in den meisten Fällen jedoch gibt das Quant einen Teil seiner Energie an das Atom ab, mit dem der Zusammenprall erfolgt ist. (Compton-Effekt)(37).

Das getroffene Atom gibt beim Photo- und beim Compton-Effekt nach dem Zusammenprall ein Elektron ab, das die vom Röntgenquant verlorene Energie in Form kinetischer Energie enthält. Diese Elektronen führen in nächster Nähe ihres Entstehungsortes zu Ionisationsprozessen, welche für die Wirkungen der Röntgenstrahlung in biologischem Material verantwortlich sind:

Es handelt sich dabei um die Entstehung von Ionen und freien Radikalen wie z.B. H^+ und OH^- . Diese wiederum führen durch Veränderungen des molekularen Aufbaus der biochemischen Zellbausteine zu Störungen im Stoffwechsel und im genetischen Material lebender Zellen (37).

Nach Einwirkung hoher Strahlungsdosen kann es durch Entgleisung des Zellstoffwechsels oder Zerstörung der Erbinformation zum Absterben einzelner Zellen oder des ganzen Individuums kommen.

Je niedriger die Energie der Röntgenstrahlung ist, umso größer ist ihre Wechselwirkung mit dem durchstrahlten

Objekt und damit auch ihre Wirkung in biologischem Material.

2.1.2.1.3. Röhrenspannung

Die Energie der erzeugten Röntgenstrahlung ist direkt abhängig von der an die Röhre angelegten Spannung.

Je höher die Röhrenspannung, umso größer ist die durchschnittliche Energie der entstehenden Quanten.

Die in der Röntgendiagnostik verwendete Röhrenspannung beträgt zwischen 30 000 und 150 000 Volt, d.h. zwischen 30 und 150 kV(Kilovolt) (37).

Um die biologischen Wirkungen möglichst gering zu halten, filtert man die Strahlungsanteile mit geringer Energie schon beim Austritt aus dem Röntgenstrahler mittels dünner Metallbleche, die vor dem Austrittsfenster angebracht werden, so aus dem Strahlungsspektrum heraus, daß nur die "härteren", d.h. energiereicheren Anteile der Strahlung auf das Objekt treffen. Bei Weichteilaufnahmen hingegen, wie z.B. bei der Mammographie, wird wegen der geringen Dichteunterschiede des Aufnahmeobjekts eine relativ "weiche" Strahlung von ca. 30 kV Röhrenspannung verwendet.

2.1.2.1.4. Röhrenstrom

Unter dem Röhrenstrom versteht man den zwischen Kathode und Anode der Röntgenröhre fließenden Elektronenstrom.

"Die Angaben des Röhrenstroms in Milliampere (mA) bedeuten den arithmetischen Mittelwert des während der Einschaltzeit der Röhre fließenden Stroms" (Zitat aus (1)).

Die Anzahl der pro Zeiteinheit von einer Röntgenröhre ausgesandten Quanten ist umso höher, je größer der fließende Röhrenstrom ist.

2.1.2.1.5. Schaltzeit der Röntgenröhre

Unter Schaltzeit versteht man die Zeit, in der der Röntgenröhre elektrische Energie zur Strahlenerzeugung für eine Aufnahme zugeführt wird (1). Die Schaltzeit wird in Sekunden angegeben.

Da die Zahl der zwischen Kathode und Anode der Röntgenröhre fließenden Elektronen und damit die Zahl der erzeugten Quanten sowohl vom Röhrenstrom als auch von der Schaltzeit abhängt, gibt man diese beiden Größen nicht getrennt an sondern zusammengefaßt als Milliampere-Sekunden-Produkt (mAs-Produkt).

Um die Belastung für den Patienten möglichst gering zu halten, sollte dieser von einer möglichst geringen Anzahl an Röntgenquanten getroffen werden, andererseits benötigt man für eine ausreichende Bildqualität eine bestimmte Energiemenge in Bildebene:

- Verwendet man Quanten von niedriger durchschnittlicher Einzelenergie, d.h. eine niedrige Röhrenspannung, so ist eine große Anzahl dieser Quanten erforderlich, gleichbedeutend mit einem hohen mAs-Produkt.

- Verwendet man dagegen Quanten von hoher durchschnittlicher Einzelenergie, d.h. hohe Röhrenspannung, so kommt man mit einem geringeren mAs-Produkt aus. Die Belastung ist in diesem Fall für den Patienten geringer und zudem geht die härtere Strahlung wie bereits beschrieben weniger biologische Wechselwirkung mit dem durchstrahlten Gewebe ein.

2.1.2.1.6. Röhrenfokus

Die Fläche der Röhrenanode, auf die das von der Kathode ausgehende Elektronenstrahlenbündel auftrifft, bezeichnet man als Röhren-Brennfleck, den Mittelpunkt dieser Fläche als Röhrenfokus (1). Die Größe des Brennflecks steht in direktem Zusammenhang mit dem Röhrenstrom:

Die Höhe des Röhrenstroms ist durch die thermische Belastbarkeit der Anode begrenzt. Je größer der Brennfleck einer Röhre ist, umso besser läßt sich die entstehende Wärme ableiten, umso größer ist deshalb auch der erlaubte Röhrenstrom. Gegenüber einem kleineren Brennfleck läßt sich somit die Schaltzeit bei gleichbleibendem mAs-Produkt verkürzen. Andererseits führt die Vergrößerung des Brennflecks zu einer Zunahme der geometrischen Unschärfe. Die geometrische Unschärfe hat zur Folge, daß Objektgrenzen unscharf wiedergegeben werden (Abb. 2).

Der Bereich der geometrischen Unschärfe ist umso kleiner, je weiter das Aufnahmeobjekt vom Brennfleck entfernt ist, je kleiner der Abstand zwischen Objekt und Kassette ist und je kleiner der Brennfleck ist.

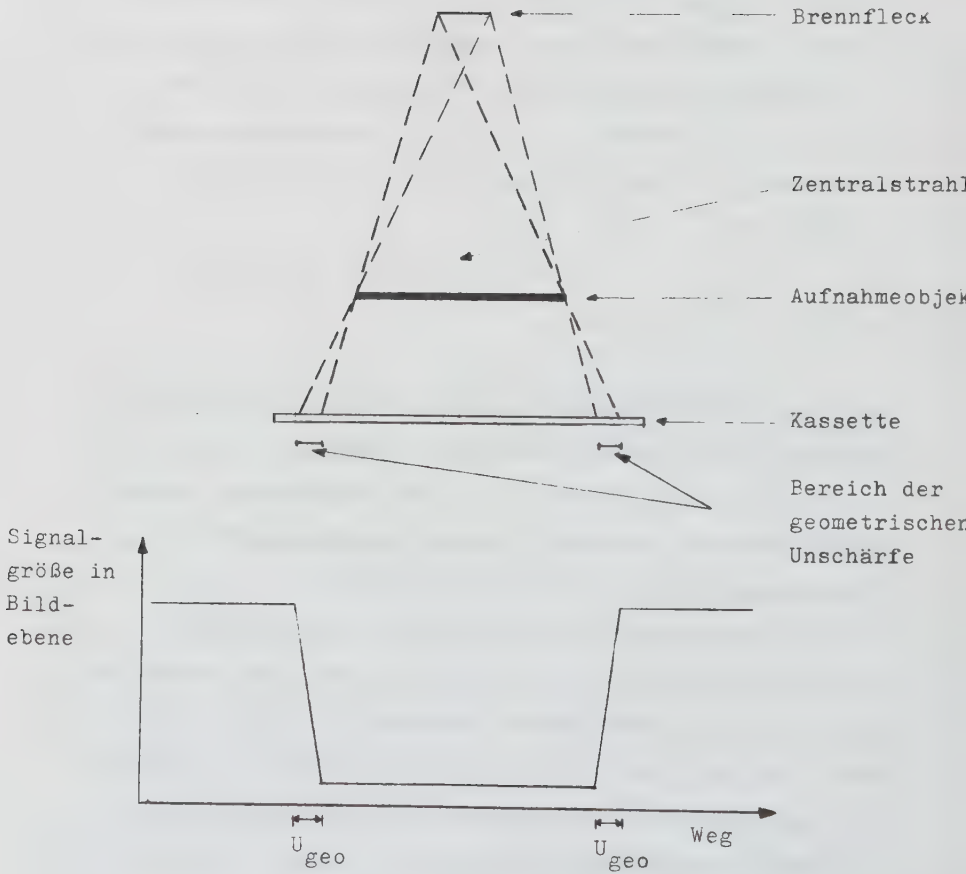


Abb. 2 Darstellung der geometrischen Unschärfe
(schematisch nach (1))

2.1.2.1.7. Tiefenblende:

Sie ist am Röhrengehäuse angebracht und besteht aus mehreren hintereinander angeordneten strahlenundurchlässigen Platten, die das aus der Röhre austretende Strahlenbündel von allen Seiten begrenzen.

Mit Hilfe eines eingebauten Lichtvisiers läßt sich der Durchmesser des Nutzstrahlenbündels auf die Größe des zu untersuchenden Objekts einstellen. Dadurch wird zum einen die Strahlenbelastung des Patienten (Eintrittsdosis) vermindert und zum anderen das durchstrahlte Volumen des Aufnahmeobjekts verkleinert, wodurch der Anteil der Streustrahlung abnimmt.

2.1.2.1.8. Abstand Röhrenfokus - Aufnahmeobjekt

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2.1.6. beschrieben, ist die geometrische Unschärfe umso kleiner, je größer der Abstand zwischen Brennfleck und Aufnahmeobjekt ist (Fokus-Objekt-Abstand, FOA).

Da die Luft zwischen Röhre und Objekt in geringem Maß für die Röntgenstrahlung absorbierend wirkt und da energiearme Quanten besser absorbiert werden als energiereiche, führt die Vergrößerung des FOA zu einer Aufhärtung der Strahlung, d.h. der energiearme Anteil des Strahlenspektrums dringt nicht mehr bis zur Oberfläche des Objekts vor.

Je größer der FOA ist, umso besser nähern sich die Ausbreitungsrichtungen der Strahlung dem Idealfall der

Parallelität. Bei unendlich weit entferntem Brennfleck würden die Röntgenstrahlen parallel auf das Objekt treffen. Auf diese Weise würde es unvergrößert und unverzerrt im Bild wiedergegeben. Die Verzerrung ist umso größer, je kleiner der FOA ist. Dieser Effekt wird z.B. bei der Kiefergelenkaufnahme nach Parma diagnostisch genutzt: Der Röntgenstrahler wird dabei direkt an die Hautoberfläche des Patienten im Bereich eines Kiefergelenks angelegt. Die Filmkassette wird an die gegenüberliegende Seite des Kopfes gebracht. Diese Anordnung führt dazu, daß das röhrennahe Kiefergelenk überdimensional vergrößert wird und nur das filmnahe Kiefergelenk nahezu in Originalgröße auf dem Film abgebildet wird.

Für das Maß der Vergrößerung ist auch der Abstand zwischen Objekt und Film von Bedeutung: Je größer der Abstand ist, umso mehr wird das Objekt im Bild vergrößert wiedergegeben. Da diese Entfernung in der Praxis möglichst gering gehalten wird, gibt man nicht den FOA oder den Objekt-Film-Abstand an, sondern die Distanz zwischen Röhrenfokus und Filmebene, den sogenannten Fokus-Film-Abstand FFA.

2.1.2.2. Das Aufnahmeobjekt

Eigenschaften des Aufnahmeobjekts, die für die Qualität einer Röntgenaufnahme von Bedeutung sind:

- atomarer und molekularer Aufbau des Objekts
- Dicke des Objekts und Dichteverteilung im Objekt
- äußere und innere Bewegungsvorgänge des Objekts

Von den genannten Eigenschaften hängt die Wahl der Aufnahmefaktoren Röhrenspannung, Brennfleckgröße, Röhrenstrom, Schaltzeit, FFA, Streustrahlenraster und Film-Folien-Kombination ab.

2.1.2.2.1. Atomarer und molekularer Aufbau des Objekts

Wie bereits im Abschnitt 2.1.2.1.2. beschrieben, besitzt die Röntgenstrahlung die Eigenschaft Materie zu durchdringen. Die Strahlung wird beim Auftreffen auf oder beim Durchtritt durch Materie geschwächt. Das Maß der Schwächung wird durch den Schwächungskoeffizienten angegeben.

Der Schwächungskoeffizient μ eines Materials für Röntgen- oder γ -Strahlung ist definiert als Quotient

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dx}$$

wobei N die Anzahl der Quanten, die senkrecht auf eine Schicht der Dicke dx trifft und dN die Anzahl der Quanten bedeuten, die eine Wechselwirkung in der Schicht erfahren (1). Unter Wechselwirkung sind in diesem Fall Prozesse zu verstehen, bei denen sich Energie oder Richtung der Quanten ändern.

Der Schwächungskoeffizient stellt eine Materialkonstante dar und besitzt für jedes Atom bzw. Molekül einen charakteristischen Wert. Außerdem ist er in folgender Weise von der Quantenenergie der Strahlung abhängig:

Für hohe Quantenenergien hat er niedrige Werte , die mit fallender Quantenenergie ansteigen. Allgemein gilt: Harte Röntgenstrahlung durchdringt Materie leichter als weiche Röntgenstrahlung.

2.1.2.2.2. Dicke und Dichte des Objekts

Je dicker ein Objekt ist, umso mehr Strahlenanteile werden in ihm absorbiert oder gestreut. Da zur ausreichenden Belichtung des Röntgenfilms eine konstante Strahlenenergiemenge in Filmebene benötigt wird, ist mit wachsender Dicke des Objekts eine Erhöhung des mAs-Produkts oder der Röhrenspannung erforderlich.

Die im Objekt vorhandenen Dichteunterschiede bewirken eine unterschiedliche Schwächung der angewandten Röntgenstrahlung, welche zu einer unterschiedlichen Schwärzung des Röntgenfilms führt. Je ausgeprägter die Dichteunterschiede im Objekt sind, umso stärker wird die Intensität der Schwärzung im Bild schwanken. Diese unterschiedliche Schwärzung des Films kann diagnostisch genutzt werden.

Da also in der Radiologie Dichteunterschiede dargestellt werden, ist es üblich, den Schwächungskoeffizienten μ auf die Dichte ρ des strahlenschwächenden Materials zu beziehen. Man erhält dann den Massenschwächungskoeffizienten $\frac{\mu}{\rho}$.

2.1.2.2.3. Bewegung des Objekts

Es sind sowohl äußerlich sichtbare als auch im Körperinneren ablaufende Bewegungsvorgänge von Bedeutung.

Die äußerlich sichtbaren Bewegungen spielen vor allem in der Kinderradiologie eine Rolle, während sie bei der Untersuchung des Erwachsenen nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Da aber auch im Inneren des menschlichen Körpers ständig Bewegungsvorgänge ablaufen, wie z.B. Herzmuskelkontraktion, Atmung und Darmperistaltik, darf dieser Faktor bei der Anfertigung einer Röntgenaufnahme nicht unberücksichtigt bleiben. Die Geschwindigkeit der Bewegungen im menschlichen Körper beträgt nach Lissner (35) zwischen 1 mm/sec und 500 mm/sec.

Die Belichtungszeit einer Röntgenaufnahme sollte so kurz sein, daß das Röntgenbild nur eine Momentaufnahme aus dem Bewegungsvorgang erfaßt. Ist die Belichtungszeit zu lang, so verändert das abzubildende Detail seine Lage und wird dadurch unscharf abgebildet, es kommt zur sogenannten Bewegungsunschärfe. In der Photographie werden solche Aufnahmen als verwackelt bezeichnet.

Entsprechend den zu erwartenden Bewegungsvorgängen muß der Radiologe die Wahl der Schaltzeit und der übrigen Aufnahmeparameter treffen, um technisch einwandfreie Aufnahmen zu erhalten.

2.1.2.3. Das Streustrahlenraster

Die im Aufnahmeobjekt entstehende Streustrahlung wird nach dem Austritt aus dem Objekt durch ein sogenanntes Bucky-Streustrahlenraster weitgehend eliminiert, welches zwischen Objekt und Aufnahmekassette angeordnet ist (benannt nach Dr. Gustav Bucky, deutsch-amerikanischer Radiologe, 1880-1963). Es besteht aus dünnen, dicht nebeneinander liegenden Bleilamellen, die die Streustrahlung in hohem Maß absorbieren. Die Zwischenräume sind mit einem strahlendurchlässigen Stoff ausgefüllt (Abb. 3).

Ein Streustrahlenraster ist im wesentlichen durch zwei Größen zu beschreiben:

- Die Anzahl der Lamellen pro Zentimeter (sie liegt für handelsübliche Raster bei 20 bis 40 (l))
- Das Schachtverhältnis. Hierunter versteht man das Verhältnis aus der Höhe der Lamellen zu deren Abstand (Nach Angerstein (1) liegt das Schachtverhältnis zwischen 5:1 und 15:1)

Um die Abbildung der Lamellen auf dem Röntgenbild zu vermeiden, wird das Streustrahlenraster während der Aufnahme rasch hin und her bewegt. Bezüglich des Rasters sind bei der Vorbereitung der Röntgenaufnahme zwei Dinge zu beachten:

- Zentrierung des Aufnahmesystems
- Fokussierung des Aufnahmesystems

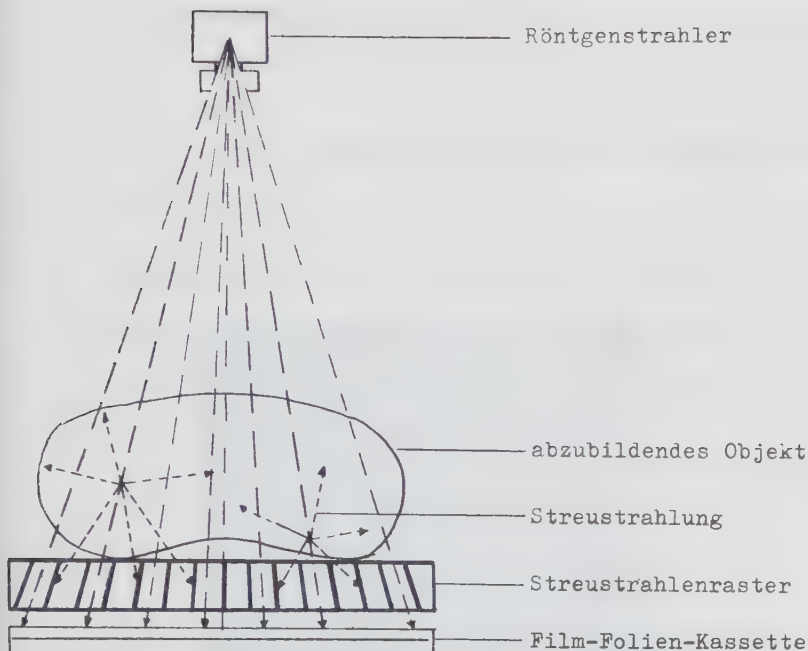


Abb. 3 Wirkungsweise eines Streustrahlenrasters
(modifiziert nach (1))

2.1.2.3.1. Zentrierung des Aufnahmesystems

Die Lamellen des Rasters stehen hochkant in Ausbreitungsrichtung des Nutzstrahlenbündels und sind bei zweidimensionaler Betrachtung auf einen Punkt ausgerichtet, der in der Ebene der mittleren Lamelle liegt. In diesem Punkt soll sich bei der Aufnahme der Brennfleck der Röhre befinden.

Liegt der Brennfleck seitlich verschoben von diesem Punkt, so spricht man von einer Dezentrierung des Aufnahmesystems. Dies führt zu einer Abschattung im Röntgenbild.

2.1.2.3.2. Fokussierung des Aufnahmesystems

Falls der Brennpunkt der Röhre zwar in der Ebene der mittleren Lamelle des Rasters liegt, jedoch die Entfernung Brennpunkt - Raster nicht der Ausrichtung der Lamellen entspricht, so kommt es zu einer Defokussierung des Aufnahmesystems, die durch ungleichmäßige Abschattung im Röntgenbild erkennbar wird.

2.1.2.4. Die Kassette

Die für die Anwendung mit Film-Folien-Kombinationen verwendeten Kassetten sind flache, aufklappbare und lichtdicht schließende Behälter aus dünnem Aluminiumblech.

In der Kassette liegt zwischen zwei Verstärkerfolien der Röntgenfilm. Um einen gleichmäßigen Andruck der Verstärkerfolien an den Film zu erreichen, ist zwischen Kassettenwand und Verstärkerfolie eine elastische Schicht aus Filz oder Schaumstoff angebracht. Der gleichmäßige Andruck läßt sich mit Hilfe eines einfachen Verfahrens überprüfen:

Man verwendet dazu eine Metallplatte, die mit Bohrlöchern von gleichem Durchmesser in gleichmäßigen Abständen versehen ist (Abb. 4). Diese Platte legt man direkt auf die

zu überprüfende Kassette und setzt die Anordnung so lange der Röntgenstrahlung aus, bis der entwickelte Film eine Schwärzung von $S = 2$ bis 3 aufweist. Betrachtet man das gewonnene Bild aus mindestens 3 m Abstand vom Leuchtkasten, so sind nicht optimale Anpressungen durch verwaschene Grauzonen zu erkennen (32).

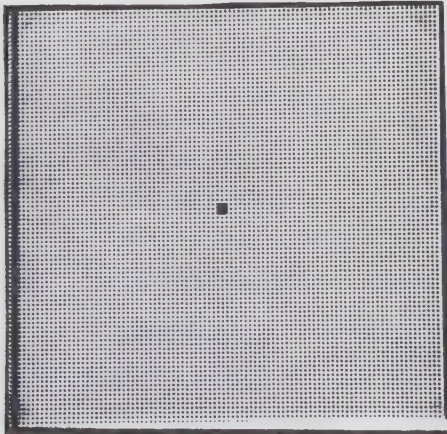
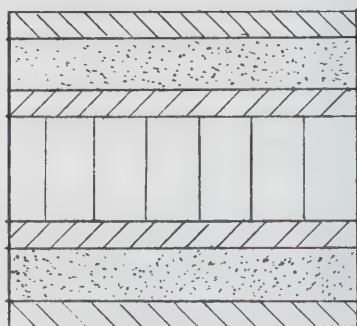


Abb. 4 Röntgenaufnahme der Bohrlochplatte zur
Überprüfung des gleichmäßigen Kassettenandrucks

2.1.2.5. Der Röntgenfilm

Der entwickelte Röntgenfilm stellt eine zweidimensionale Abbildung eines dreidimensionalen Objektes in verschiedenen Graustufen dar.

In Verbindung mit Verstärkerfolien werden sogenannte Doppelschichtfilme verwendet, die aus mehreren Schichten aufgebaut sind (Abb. 5):



Schutzschicht

lichtempfindliche Schicht

Haftschicht

Trägerschicht

Haftschicht

lichtempfindliche Schicht

Schutzschicht

Abb. 5 Aufbau eines Röntgenfilms (schematisch aus (1))

Die Trägerschicht besteht aus eingefärbtem, transparentem Polyester und hat eine Stärke von 170 - 200 μm . Um die Strahlenbelastung für den Patienten möglichst gering zu halten, belegt man den Träger auf beiden Seiten mit einer lichtempfindlichen Schicht und erreicht so mit der gleichen Dosis fast die doppelte Filmschwärzung im Vergleich zum einseitig belegten Film (1). Die Haftung zwischen Träger-

schicht und lichtempfindlicher Schicht gewährleistet eine dünne Kunststoffschicht, die auch als Substratschicht bezeichnet wird (1).

Die lichtempfindliche Substanz ist ein Silberhalogenid (Silberbromid und Silberchlorid), dessen Silberionen nach der Röntgenbestrahlung durch den Entwicklungsvorgang zu metallischem Silber reduziert werden, das die Schwärzung der photographischen Schicht bewirkt.

Die etwa $1\mu\text{m}$ großen Bromsilberkristalle werden mit Gelatine zu einer photographischen Emulsion verarbeitet, die auf die Haftschrift aufgetragen wird. Die Empfindlichkeit eines Röntgenfilms hängt von seiner Belegungsichte mit lichtempfindlicher Substanz pro Flächeneinheit ab. Unter der Empfindlichkeit versteht man die Abhängigkeit der Filmschwärzung von der auftreffenden Strahlenenergiemenge. Je höher die Belegungsichte ist, umso größer ist auch die erreichbare Schwärzung bei gleichbleibender Strahlenenergiemenge. Die Belegungsichte mit Silber beträgt bei den für die Verwendung mit Verstärkerfolien vorgesehenen Filmen etwa $7 - 11 \text{ g/m}^2$, bei Filmen ohne Folien etwa $12 - 25 \text{ g/m}^2$ (1). Mit zunehmender Belegungsichte steigt die Dicke der lichtempfindlichen Schichten des Röntgenfilms. Sie liegt bei Folienfilmen zwischen 10 und $18\mu\text{m}$, bei Filmen ohne Folien zwischen 25 und $35\mu\text{m}$ (1).

Je höher die Dicke der lichtempfindlichen Schichten und je größer der Durchmesser der lichtempfindlichen Kristalle ist, umso geringer ist die mit diesem Film erreichbare Bildschärfe.

Zum Schutz gegen mechanische Einwirkungen wird der Röntgenfilm auf beiden Seiten mit einer dünnen, transparenten Schutzschicht überzogen.

2.1.2.6. Die Verstärkerfolien

Einer der wichtigsten Faktoren für die technische Qualität der Röntgenaufnahme und die Strahlenbelastung des Patienten ist die Verwendung einer geeigneten Röntgenverstärkerfolie. Die Aufgabe der Verstärkerfolie ist es, die Röntgenstrahlung in sichtbares Licht umzuwandeln. Ihr Aufbau und ihre Eigenschaften werden ausführlich im folgenden Abschnitt 2.2. beschrieben.

2.2. Die Bedeutung der Verstärkerfolien

Die Emulsionsschicht des Röntgenfilms ist nicht für alle Arten von elektromagnetischen Wellen gleich empfindlich: Silberhalogenidkristalle besitzen ein Maximum der Empfindlichkeit im Bereich des sichtbaren blauvioletten Lichts, im Bereich der Wellenlänge der Röntgenstrahlung sind sie dagegen wesentlich weniger empfindlich. Dies nützt man dadurch aus, daß man die Röntgenstrahlung in sichtbares Licht umwandelt. Für die Herstellung der Verstärkerfolien (auch Folien genannt), verwendet man Kristalle, die beim Auftreffen von Röntgenstrahlung sichtbares Licht aussenden. Für einige Leuchtkristallarten liegt dieses Licht im Bereich

des blauviolettten Spektrums, d.h. im maximalen Empfindlichkeitsbereich der photographischen Schichten des Films.

Nur 2 - 5 % der nach dem Entwicklungsvorgang resultierenden Filmschwärzung werden durch direkte Einwirkung von Röntgenquanten auf die photographischen Schichten hervorgerufen, 95 - 98 % der Filmschwärzung verursacht die mit Leuchtkristallen belegte Verstärkerfolie, die auf Grund der Röntgenbestrahlung sichtbares Licht aussendet (2, 6). Ohne Verstärkerfolien wäre die Strahlenbelastung für den Patienten und die Umwelt um ein Vielfaches höher.

2.2.1. Geschichtliches zur Entwicklung

Um das Jahr 1600 n. Chr. entdeckte der Schuhmacher und Alchimist Vincenzo Casciarolo die erste Leuchtsubstanz. Es handelte sich um ein Gemisch aus Bariumsulfid und Bariumsulfat (14).

Rund dreihundert Jahre später führte 1895 ein mit Bariumplatincyanoür beschichteter Fluoreszenzschirm zur Entdeckung der X-Strahlen durch W. C. Röntgen, nach dem die Strahlung später benannt wurde (14).

Im Jahre 1896 beschrieb Edison die Eigenschaft des Kalziumwolframats (CaWO_4), unter Röntgenbestrahlung sichtbares Licht von blauvioletter Farbe auszusenden (10, 15, 30).

Die aus Kalziumwolframat hergestellten Verstärkerfolien erbrachten für den Patienten eine Dosisersparung von 80 - 90 % gegenüber dem folienlosen Film (2). Auf der Stufe der CaWO_4 -Folien blieb die Entwicklung für Jahrzehnte stehen.

Erst Anfang der siebziger Jahre (1972 Buchanan (10)) wurden von der Industrie als Alternative bzw. Ergänzung zu den herkömmlichen Folien solche auf der Basis seltener Erden angeboten.

Obwohl die Verbindungen seltener Erden als Leuchtstoffe schon früher bekannt waren, wurden sie dennoch von der Industrie nicht verwendet, da sie zu teuer waren.

Die seltenen Erden kommen in der Natur unter anderem als Monazit-Erz vor, das auch die Leuchtstoffe enthält, die zur Herstellung von Farbfernsehröhren verwendet werden (25). Erst nachdem es der Industrie gelang, die Verbindungen seltener Erden durch Ionenaustauscher adsorptiv zu trennen, konnten hochreine Verbindungen wirtschaftlich in größeren Mengen hergestellt werden (14). Erst ab diesem Zeitpunkt konnten die SE-Folien (Verstärkerfolien auf der Basis seltener Erden) vom finanziellen Aspekt her mit den konventionellen CaWO_4 -Folien konkurrieren.

Zudem schienen die SE-Folien eine höhere Lichtausbeute und damit eine Dosisreduzierung zu ermöglichen.

2.2.2. Aufbau einer Verstärkerfolie

Eine Verstärkerfolie besteht aus vier Schichten (Abb. 6): Auf eine Trägerschicht aus Polyester wird eine - wegen der besseren Lichtreflexion hell eingefärbte - Haftschrift aufgebracht. Darauf folgt die Leuchtschicht: die in ein Bindemittel eingegossenen Leuchtkristalle wandeln die auftreffenden Röntgenstrahlen in sichtbares Licht um.

Da die Leuchtkristalle aus der Oberfläche der Leuchtschicht herausragen und außerdem hygroskopische Eigenschaften aufweisen, ist die Folie mit einer Schutzschicht versehen. Die Dicke der einzelnen Schichten ist aus Abb. 6 ersichtlich.

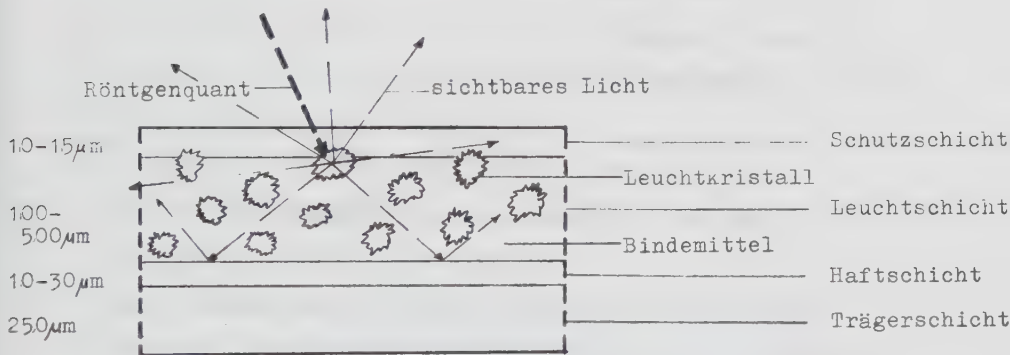


Abb. 6 Aufbau und Wirkungsweise einer Röntgenverstärkerfolie (modifiziert nach Krestel (30))

2.2.3. Faktoren, die die Eigenschaften einer Verstärkerfolie bestimmen

Durch den hohen Prozentsatz der Filmschwärzung, den die Verstärkerfolie verursacht, ist den Eigenschaften der Folie in Bezug auf die zu erwartende Bildqualität ein besonders hoher Stellenwert zuzumessen.

Wesentlich für die Eigenschaften einer Verstärkerfolie sind folgende Faktoren:

- Die Art der verwendeten Leuchtkristalle
- Die Korngröße der einzelnen Leuchtkristalle
- Die Belegungsdichte der Folie mit Leuchtkristallen
- Das Bindemittel, in das die Leuchtkristalle eingebettet sind
- Die Haftschrift
- Die Schutzschicht

2.2.3.1. Art der verwendeten Leuchtkristalle

Die Eigenschaften einer Folie werden im wesentlichen durch die als Leuchtstoff verwendete Substanz bestimmt.

Chemische und physikalische Merkmale des Leuchtstoffs sind entscheidend für die wichtigsten Daten einer Verstärkerfolie, nämlich die Wellenlänge, d.h. die Farbe des ausgesandten Lichts und die Lichtausbeute der Folie, d.h. den Anteil der Röntgenstrahlenenergie, der in sichtbares Licht umgewandelt wird

2.2.3.1.1. Chemische Eigenschaften

Die für die Herstellung von Verstärkerfolien verwendeten Leuchtstoffe besitzen Kristallstruktur und sind von unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung.

Viele dieser Substanzen werden erst durch den Einbau von

sogenannten Aktivatoratomen (1) in das Kristallgitter zur Lumineszenz, d.h. zur Umwandlung von Röntgenstrahlung in sichtbares Licht, befähigt.

Die Aktivatoren sind kristallfremde Atome wie z.B. Terbium (Tb), Europium (Eu), oder Blei (Pb), an denen der Emissionsakt stattfindet (1).

Beim Kalziumwolframat ist eine Aktivierung durch Fremdatome nicht notwendig, da das Wolframation selbst die Kristalle beim Auftreffen von Röntgenstrahlung zur Aussendung (Emission) von sichtbarem Licht anregt.(30)

Als Leuchtsubstanzen werden vor allem verwendet:

- CaWO_4 (Kalziumwolframat)
- $\text{BaSO}_4\text{:Pb}$ (Bariumsulfat - Bleiaktiviert)
- LaOBr:Tb (Lanthanoxibromid - Terbiumaktiviert)
- $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4\text{:Eu}$ (Barium-,Strontium-Sulfat - Europiumaktiviert)
- BaFCl:Eu (Bariumfluorchlorid - Europiumaktiviert)
- $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (Digadolinium-dioxisulfid - Terbiumaktiviert)
- $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (Dilanthan-dioxisulfid - Terbiumaktiviert)
- $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (Diyttrium-dioxisulfid - Terbiumaktiviert)

2.2.3.1.2. Physikalische Eigenschaften

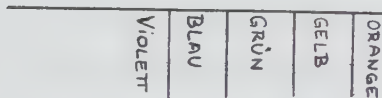
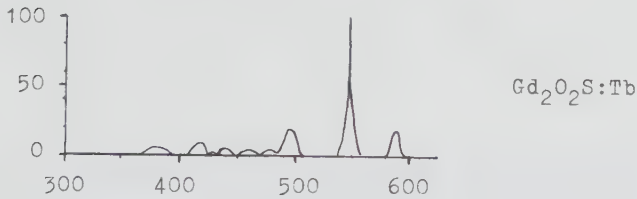
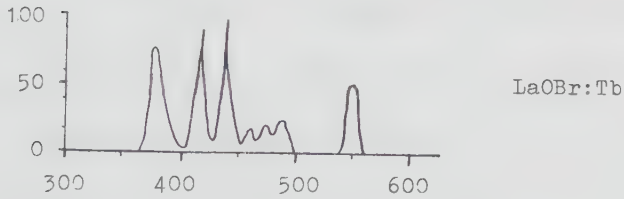
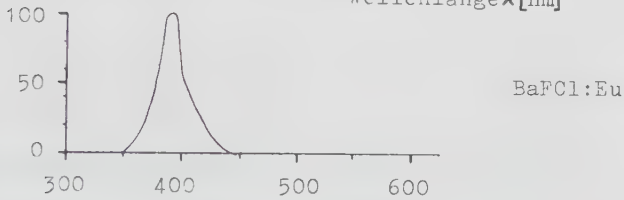
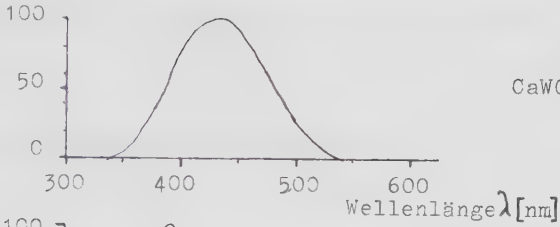
Für alle Kristallarten, die als Leuchtstoff in Verstärkerfolien Verwendung finden, gilt, daß sie auftreffende Röntgenstrahlung in sichtbares Licht umwandeln.

Unterschiedlich sind dabei die Wellenlängen des emittierten Lichts und die Höhe der Lichtausbeute.

Trifft ein Röntgenquant auf ein CaWO_4 -Kristall, so findet in den äußeren Elektronenschalen der Kristallatome eine Umwandlung der Energie in sichtbares Licht der Wellenlänge 310 - 550 nm statt. Beim Auftreffen vieler Röntgenquanten auf eine CaWO_4 -Verstärkerfolie ergibt sich ein kontinuierliches Emissionsspektrum mit einem Maximum bei 425 nm, d.h. im blauvioletten Bereich des sichtbaren Lichts. Der grundlegende Unterschied zwischen CaWO_4 und den SE-Leuchtstoffen besteht darin, daß bei den SE-Leuchtkristallen die Röntgenquanten in den inneren Elektronenschalen in sichtbares Licht umgewandelt werden (13). Das ausgesandte Licht hat dadurch nicht den Charakter eines kontinuierlichen Spektrums, sondern die Lumineszenz erfolgt in Form schmaler Spektrallinien einer bestimmten Wellenlänge, die von Leuchtstoffart zu Leuchtstoffart verschieden ist. Ein Leuchtstoff kann mehrere solcher Emissionsspitzen von unterschiedlicher Leuchtstärke aufweisen.

In Abb. 7 sind die Emissionsspektren von CaWO_4 , BaFCl:Eu , LaOBr:Tb und $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ graphisch dargestellt. Auf der Abszisse der Diagramme ist jeweils die Wellenlänge des bei Röntgenbestrahlung ausgesandten Lichts aufgetragen. Die Ordinate trägt ein willkürliches Maß für die Intensität der ausgesandten Lichtstrahlung. Die Diagramme geben an, wie intensiv die Lichtstrahlung für die einzelne Kristallart in den jeweiligen Spektralbereichen ist. Der Spektralbereich mit der größten Lichtintensität wurde gleich 100 gesetzt. Da auf diese Art kein direkter Vergleich der absoluten Lichtausbeute der einzelnen Leuchtstoffe möglich ist, wurde die

relative Intensität



Farbempfinden des
Menschlichen Auges

Abb. 7 Emissionsspektren verschiedener Leuchtstoffe
(modifiziert nach Krestel (30))

Bezeichnung "relative Intensität" verwendet.

Zur Verdeutlichung ist unter den Diagrammen das Farbpfinden des menschlichen Auges dargestellt:

Das CaWO_4 sendet Licht der Wellenlängen 310 bis 550 nm in Form eines kontinuierlichen Spektrums mit einem Maximum bei 425 nm aus, d.h. das emittierte Licht hat eine blau-violette Farbe.

BaFCl:Eu weist ebenfalls ein kontinuierliches Spektrum auf, jedoch liegen die Wellenlängen in einem schmäleren Spektralbereich zwischen 350 und 450 nm. Das Emissionsmaximum liegt im Bereich des violetten Lichts bei 385 nm.

LaOBr:Tb besitzt kein kontinuierliches Emissionsspektrum, sondern es sendet Licht unterschiedlicher Intensität in verschiedenen Wellenlängen in spektral eng begrenzten Linien aus. Die größte Intensität besitzt das Licht der Wellenlänge 437 nm (blau). Im Vergleich dazu leuchtet das LaOBr:Tb im gelb-grünen Bereich bei 550 nm nur halb so intensiv.

Das $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ besitzt ebenfalls ein Linienspektrum mit einer intensivsten Wellenlänge von 550 nm, d.h. es sendet Licht von gelb-grüner Farbe aus. Im Bereich des blau-violetten Lichts emittiert diese Substanz nahezu überhaupt nicht.

Da das Silberbromid in den herkömmlichen Röntgenfilmen nur auf blau-violettes und blaues Licht mit einer ausreichenden Schwärzung reagiert, ist mit einer $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ - Verstärkerfolie und einem herkömmlichen Film keine Dosiseinsparung gegenüber dem folienlosen Film zu erwarten. Für Leuchtstoffe,

die nur im gelb-grünen Bereich Licht aussenden, wurden deshalb Röntgenfilme entwickelt, die auch in diesem Spektralbereich mit einer Schwärzung reagieren. Ihre Empfindlichkeit im blauen Anteil des Spektrums ist jedoch geringer als die der herkömmlichen blau-empfindlichen Filme (30).

Zur Ausnützung aller positiven Eigenschaften (in diesem Fall die starke Lichtemission im gelb-grünen Bereich) müssen also die einzelnen Bestandteile eines Abbildungssystems aufeinander abgestimmt werden.

Die Höhe der Lichtausbeute eines Leuchtstoffs wird durch zwei Materialeigenschaften der Leuchtkristalle wesentlich mitbestimmt:

1. Die unterschiedliche Fähigkeit der Leuchtkristalle, die Energie der Röntgenquanten zu absorbieren.
2. Die unterschiedlich hohe Ausbeute bei der Umwandlung der absorbierten Energie in sichtbares Licht.

zu 1.: Die Schwächung der Röntgenstrahlung durch einen Leuchtstoff ist sowohl von seiner chemischen Zusammensetzung als auch von der Energie der auftreffenden Röntgenquanten abhängig. Trägt man den Schwächungskoeffizienten (Abschn. 2.1.2.2.1.) einer Leuchtsubstanz über der Quantenenergie der Röntgenstrahlung auf, so erhält man für jede Substanz eine materialspezifische Kurve. Die in diesen Kurven auftretenden Unstetigkeiten, an Hand derer sich die Leuchtstoffe unterscheiden lassen, werden als Absorptionssprünge bezeichnet, die zugehörigen Wellenlängen als kurzwellige Absorptionskanten (1). Diese Unstetigkeiten beruhen auf selektiver

Absorption der Strahlung bei Quantenenergien, die gleich denen der charakteristischen Strahlung des Leuchtstoffs sind (1). Praktisch bedeutet dies, daß der Leuchtstoff oberhalb einer bestimmten Quantenenergie die Strahlung besonders stark schwächt. In Abb. 8 ist dieser Sachverhalt für drei Leuchtstoffe graphisch dargestellt. Es ergibt sich daraus, daß die kurzwellige Asorptionskante des CaWO_4 bei einer höheren Quantenenergie liegt als die des $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ und die des $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$. Wie bereits beschrieben, nimmt jedoch die Schwächung der Strahlung für alle Leuchtstoffe mit zunehmender Quantenenergie ab.

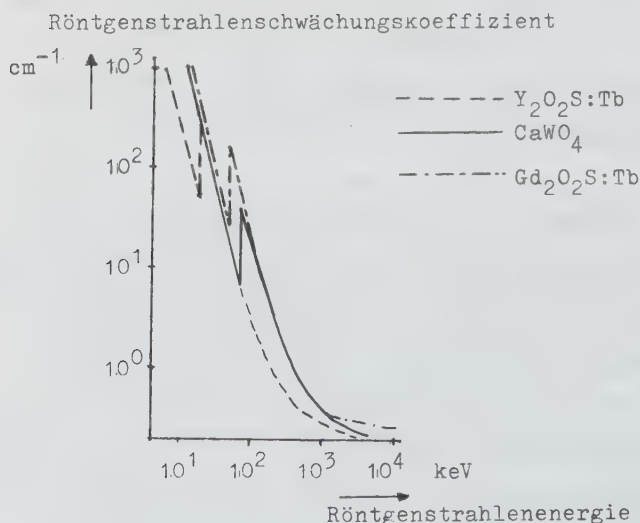


Abb. 8 Röntgenstrahlenschwächung einiger Leuchtstoffe in Abhängigkeit von der Quantenenergie der Strahlung (modifiziert nach Degenhardt (13))

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Röntgenstrahlenenergieabsorption einiger Leuchtstoffe für eine Röhrenspannung von 80 kV und eine Filterung von 20 cm Wasser. Die Leuchtstoffe waren zu Verstärkerfolien mit einer Belegungsichte von 100 mg Leuchtstoff pro cm^2 verarbeitet. In der Tabelle ist die prozentuale Schwächung der einfallenden Röntgenstrahlung durch die jeweilige Verstärkerfolie und die relative Absorption der jeweiligen Leuchtsubstanz,bezogen auf das herkömmliche Kalziumwolframat,angegeben.

Demzufolge weist das $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ bei der oben genannten Strahlenqualität nahezu die gleiche schwächende Wirkung auf wie CaWO_4 , während die übrigen drei Leuchtstoffe 1,4 bzw. 1,5 mal stärker schwächend wirken.

Verstärkerfolie 100 mg Leuchtstoff/ cm^2	Absorption	Relative Absorption auf CaWO_4 bezogen
CaWO_4	26,7%	1,00
$\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	27,0%	1,01
$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	37,7%	1,41
BaFCl:Eu	39,7%	1,49
LaOBr:Tb	41,0%	1,55

Tabelle 1 Röntgenstrahlenabsorption und relative Absorption bezogen auf CaWO_4 für einige Leuchtstoffe
(In Anlehnung an Degenhardt (13))

zu 2.: Entscheidend für die Höhe der Lichtausbeute ist jedoch nicht allein die Absorption der Strahlenenergie, sondern der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Röntgenstrahlen in sichtbares Licht. Laut Tab. 1 zeigt beispielsweise $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ die gleiche Absorption wie das CaWO_4 , nach Tab. 2 verwandelt $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ jedoch 4,5 mal soviel Röntgenenergie in sichtbares Licht im Vergleich mit CaWO_4 . In der Literatur wird für SE-Folien ein um den Faktor 4 bis 6 höherer Wirkungsgrad als für CaWO_4 -Folien angegeben (10, 13, 15, 30)(siehe auch Tab. 2). Dies würde für die Verwendung von SE-Leuchtstoffen statt CaWO_4 eine Verminderung der benötigten Strahlenenergiemenge (Dosis) um 50 - 95 % bei gleicher Filmschwärzung bedeuten (10, 15, 16). Dies wäre einer der wichtigsten Gründe für die Einführung der SE-Leuchtstoffe in die Praxis, wenn trotz der Dosis-minderung die Qualität der Röntgenaufnahmen gleich bleiben würde oder sogar verbessert werden könnte.

Sowohl mit der Absorption als auch mit dem Wirkungsgrad hängt eine weitere physikalische Eigenschaft der Leuchtstoffe zusammen: der sogenannte Härte- oder Spannungsgang (2). Man versteht darunter die Abhängigkeit der Dosisänderung von der Röhrenspannung bei konstanter Lichtausbeute.

Allgemein gilt, daß die für eine bestimmte Filmschwärzung erforderliche Dosis im diagnostisch genützten Bereich mit zunehmender Röhrenspannung abfällt (15, 19, 65). Der Verlauf dieser Kurve ist für jede Verstärkerfolie charakteristisch (siehe auch Abb. 21).

Da die Absorption der Leuchtstoffe mit zunehmender kV-Zahl abnimmt (Abb. 8), ist die Abnahme der erforderlichen Dosis nur dadurch zu erklären, daß der Wirkungsgrad bei der Umwandlung der Strahlung in sichtbares Licht mit zunehmender Röhrenspannung ansteigt.

Neben der Höhe der Lichtausbeute, d.h. der Quantität, spielt die Qualität des erzeugten sichtbaren Lichts eine entscheidende Rolle für die mit einer Verstärkerfolie erreichbare Bildqualität. Unter der Qualität ist neben der Wellenlänge des Lichts die Gleichmäßigkeit der Lichtemission über eine größere Fläche zu verstehen. Am gleichmäßigsten wäre die Lumineszenz bei einer vollkommen glatten Oberfläche der Leuchtschicht und bei Verwendung von Leuchtkristallen, die nur in eine Richtung senkrecht zur Oberfläche der Leuchtschicht Licht aussenden. Da die zur Verfügung stehenden Leuchtsubstanzen die Erfüllung dieser Bedingungen nicht erlauben, sucht man Stoffe, die dieser Idealvorstellung möglichst nahe kommen. Neben der Korngröße ist in diesem Zusammenhang vor allem die Kristallform der Leuchtstoffe entscheidend.

Die Oberfläche der Leuchtschicht ist umso glatter, je kleiner der Durchmesser der einzelnen Leuchtkristalle ist, und je gleichmäßiger deren Form ist.

Die Form der Leuchtstoffpartikel wird durch das jeweilige Kristallsystem bestimmt, in dem sie kristallisieren. Da es keine Leuchtkristalle gibt, die sich so anordnen lassen, daß sie nur senkrecht zur Oberfläche der Leuchtschicht Licht aussenden, versucht man Kristallformen auszuwählen,

die nach allen Richtungen möglichst gleichmäßige Emission aufweisen (13). Ideal wäre in dieser Hinsicht und auch in Bezug auf eine gleichmäßige Oberflächenstruktur die Form einer Kugel als Kristallform.

Die vorhandenen Leuchtstoffe weisen jedoch zum Teil Kristallformen auf, die von der Kugel erheblich abweichen.

Am nächsten kommt der Kugelform das kubische Kristallsystem, wie es $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ und $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ aufweisen, weniger ideal sind dagegen das tetragonale (CaWO_4), das orthorhombische ($\text{BaSO}_4\text{:Pb}$, $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4\text{:Eu}$, BaFCl:Eu) und das hexagonale Kristallsystem (LaOBr:Tb , $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$). Die letztgenannten Stoffe bilden keine kugelähnlichen Leuchtpartikel, sondern schollenartige Gebilde, die durch ihren kantigen Aufbau nicht nach allen Richtungen eine gleichmäßige Emission aufweisen und auch keine glatte Oberfläche der Leuchtschicht zulassen (13).

Neben der Kristallform ist nach Degenhardt (13) auch der Brechungskoeffizient der Kristalle für sichtbares Licht wichtig für die Abbildungseigenschaften einer Folie.

Der Brechungskoeffizient n , auch als Brechungszahl, Brechungsindex (1) oder Brechungsquotient (13) bezeichnet, stellt eine Materialkonstante dar und ist von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Er gibt das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im jeweiligen Medium an. Experimentell bestimmt wird der Brechungsquotient durch Messung der Ablenkung, die ein Lichtstrahl erfährt, wenn er in das Medium eintritt.

Eine hohe Lichtstreuung der Kristalle, d.h. ein hoher Brechungsquotient im Vergleich zum Brechungskoeffizienten

des Bindemittels ($n \approx 1,5$), in das die Leuchtkristalle eingebettet sind, bewirkt nach Degenhardt (13) eine optische Verwischung der Kristallinhomogenitäten, so daß die Aufnahmen weniger körnig erscheinen ("flauer Bildeindruck, Weichzeichnungseffekt")(13), während niedrige Brechungsquotienten einen körnigen Bildeindruck vermitteln.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über einige Daten der gebräuchlichsten Leuchtstoffarten.

Für jeden Leuchtstoff ist neben dem Jahr der Erstbeschreibung der Wert der kurzwelligen Absorptionskante angegeben. Wie bereits beschrieben wirkt der Leuchtstoff oberhalb dieser Quantenenergie besonders stark absorbierend für die Röntgenstrahlung. Um diese Eigenschaft zu nützen, muß die verwendete Röhrenspannung auf jeden Fall über dem angegebenen Zahlenwert in kV liegen, da z.B. eine Röhrenspannung von 50 kV Quantenenergien ergibt, die nur für wenige Quanten an 50 keV (Kilo-Elektronen-Volt) heranreicht und bei den meisten Quanten wesentlich unter diesem Wert liegt (siehe auch Abschn. 4.9).

In der Spalte "Maximum der Emission" ist die Wellenlänge in Nanometer angegeben, bei der der Leuchtstoff das intensivste Licht aussendet. Daneben das Farbempfinden des menschlichen Auges bei den jeweiligen Wellenlängen.

Die Leuchtstoffe lassen sich durch die Farbe der Lichtemission in drei Gruppen unterteilen:

- blau- bzw. blau-violett-leuchtende
- grün- bzw. grün-gelb-leuchtende
- grün- und blau-leuchtende

Röntgen- leuchtstoff	Jahr	Kurzwellige Absorptionskante	Maximum d. Emission	Farbe d. emitt. Lichts
CaWO_4	1896	69,5 keV	425 nm	blau
$\text{BaSO}_4:\text{Pb}$	1940	37,4 keV	350 nm	blau
$\text{LaOBr}:\text{Tb}$	1969	38,9 keV	437 nm	blau
$(\text{Ba},\text{Sr})\text{SO}_4:\text{Eu}$	1972	37,4 keV	380 nm	blau
$\text{BaFCl}:\text{Eu}$	1975	37,4 keV	385 nm	blau
$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$	1972	50,2 keV	545 nm	grün
$\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$	1972	38,9 keV	545 nm	grün
$\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$	1972	17,0 keV	418 nm 545 nm	blau grün

Röntgen- leuchtstoff	Umwandlung in Licht	Dichte	Kristallsystem	Brechungsquot.
CaWO_4	4 %	6,8g/cm ³	tetragonal	1,9
$\text{BaSO}_4:\text{Pb}$	4 %	4,48g/cm ³	orthorhombisch	1,6
$\text{LaOBr}:\text{Tb}$	13 %	6,28g/cm ³	hexagonal	2,3
$(\text{Ba},\text{Sr})\text{SO}_4:\text{Eu}$	6 %	4,40g/cm ³	orthorhombisch	1,6
$\text{BaFCl}:\text{Eu}$	12 %	4,56g/cm ³	orthorhombisch	1,6
$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$	15 %	7,44g/cm ³	kubisch	2,6
$\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$	12 %	5,54g/cm ³	hexagonal	2,2
$\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$	18 %	5,0g/cm ³	kubisch	1,8

Tabelle 2 Physikalische Daten der gebräuchlichsten
Röntgenleuchtstoffe (übernommen aus Degenha

Das $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, das sowohl im blauen als auch im grünen Bereich des Spektrums emittiert, wird wegen dieser Eigenschaft auch als Zweibanden-Leuchtstoff bezeichnet (13). Daraus folgt, daß es sowohl mit blau-empfindlichen als auch mit grün-empfindlichen Filmen verwendet werden kann (13).

Die Rubrik "Umwandlung in Licht" in Tabelle 2 gibt an, wieviel Prozent der einfallenden Röntgenstrahlenenergie in sichtbares Licht umgewandelt werden, d.h. wie hoch die Lichtausbeute des jeweiligen Leuchtstoffs ist.

Gegenüber dem herkömmlichen Kalziumwolframat weisen die SE-Leuchtstoffe eine drei- bis viermal höhere Lichtausbeute auf.

Die Dichte der Leuchtstoffe ist eine Materialkonstante und in der Tabelle 2 in Gramm pro Kubikzentimeter angegeben.

Die Dichte ist von Bedeutung für die Angabe der Belegungs-dichte einer Folie mit Leuchtkristallen:

Die Belegungs-dichte wird in mg/cm^2 gemessen. Besitzt beispielsweise ein Leuchtstoff A die Dichte $4,0 \text{ g/cm}^3$, und Leuchtstoff B die Dichte $8,0 \text{ g/cm}^3$, so ist die Menge an Leuchtstoff auf der Folie B nur halb so groß wie auf der Folie A, obwohl beide Folien dieselbe Belegungs-dichte aufweisen sollen.

Eine weitere physikalische Eigenschaft der Leuchtstoffe, die Einfluß auf die Haltbarkeit der Folien haben könnte, ist die Hygroskopie der Leuchtkristalle (12, 59).

Degenhardt (12) beobachtete beim Lanthanoxibromid nach 40 Tagen Lagerung bei 40°C und 95 % rel. Luftfeuchtigkeit eine Abnahme der Lichtausbeute, die umso ausgeprägter war,

je weniger Leuchtstoff die Folie pro Flächeneinheit enthielt. Es liegen derzeit jedoch keine gesicherten Erkenntnisse darüber vor, inwieweit dies unter Praxisbedingungen einen Einfluß auf Alterung und Haltbarkeit der Folien hat.

2.2.3.2. Korngröße der Leuchtkristalle

- Die Bedeutung der Größe des vom einzelnen Leuchtkristall im Film geschwärzten Areals:

Die Schwärzung des Röntgenfilms setzt sich bei genauer Betrachtung einer homogen, d.h. gleichmäßig geschwärzten Stelle aus vielen einzelnen Schwärzungspunkten zusammen. Dies hat seine Ursache im körnigen Aufbau der Leuchtschicht der Verstärkerfolie und der lichtempfindlichen Schicht des Films. Der Effekt der "Körnigkeit" im Röntgenbild ist umso stärker, je größer der Durchmesser des einzelnen "Schwärzungsflecks" ist. Mit wachsendem Durchmesser des einzelnen Flecks sinkt die Anzahl der Schwärzungspunkte pro Flächeneinheit bei gleichbleibender Filmschwärzung. Dies führt zu einem Verlust an Information durch Verringerung der Bildpunkte. Je mehr Schwärzungspunkte eine Röntgenaufnahme pro Flächeneinheit aufweist, umso mehr Information über das Aufnahmeobjekt läßt sich mit dem Abbildungssystem festhalten, mit dessen Hilfe die Aufnahme hergestellt wurde.

Zur Veranschaulichung: Ein Fernsehbild mit 50 Bildpunkten läßt weniger Details erkennen als ein Bild mit 500 Bildpunkten.

Die Größe des einzelnen Schwärzungsflecks ist im wesentlichen durch folgende Parameter bestimmt:

- durch die Menge der Lichtausbeute des einzelnen Leuchtkristalls
- durch die Größe der Leuchtkristalle
- durch den Abstand des einzelnen Kristalls von der lichtempfindlichen Schicht des Films
- durch die Lichtdurchlässigkeit des Bindemittels und der Schutzschicht der Verstärkerfolie
- durch das Maß der Lichtreflexion an der Haftschrift der Verstärkerfolie
- durch die Größe der Silberbromidkristalle im Film
- durch die Farbe des Filmträgers

Je größer die Lichtausbeute des einzelnen Leuchtkristalls ist, umso größer ist das vom einzelnen Kristall im Film geschwärzte Areal. Der gleiche Zusammenhang gilt auch für die Größe der Leuchtkristalle: je höher ihr Durchmesser, umso größer ist der resultierende Schwärzungsfleck im Film. Der Durchmesser der Leuchtkristalle wird auch als Korngröße bezeichnet und beträgt für handelsübliche Verstärkerfolien zwischen 2,5 und 12 μm (1, 2, 3). Er ist nicht für alle Kristalle einer Folie gleich, sondern streut auf Grund des Herstellungsverfahrens immer um einen Mittelwert.

Leuchtkristalle einer Art (zB. CaWO_4) werden in verschiedenen Kristalldurchmessern hergestellt. Die Folienhersteller verwenden jedoch nach Angaben von Angerstein (1) für ihre

verschiedenen Folien, die diese Art von Leuchtstoff enthalten, immer die gleiche Kristallgröße und variieren nur die Belegungsdichte (siehe auch Abschn. 2.2.3.3.).

Angerstein und Plapperer (3) haben für CaWO_4 -Folien nachgewiesen, daß die Lichtausbeute einer Folie mit steigendem Kristalldurchmesser wächst bei gleichbleibendem Leuchtstoffgehalt der Folie. Ebenso haben sie aber gezeigt, daß die Detailerkennbarkeit im Röntgenbild weit mehr von der Belegungsdichte der Folie als vom Durchmesser der Leuchtkristalle abhängig ist, solange dieser Durchmesser einen gewissen Wert nicht übersteigt (für CaWO_4 beträgt der Wert $10\text{ }\mu\text{m}$).

Die Größe des vom einzelnen Leuchtkristall geschwärzten Filmbereichs ist auch vom Abstand zwischen Leuchtkristall und lichtempfindlicher Schicht im Film abhängig.

Je größer dieser Abstand ist, umso größer ist auch der geschwärzte Fleck.

Der Abstand hängt ab :

- von der Dicke der Leuchtschicht der Folie
- von der Dicke der Schutzschichten in Folie und Film
- von der Dicke des Filmträgers

Während die ersten beiden Punkte durch die geometrische Anordnung der verschiedenen Schichten des Abbildungssystems (Abb. 5 und 6) ihre Erklärung finden, bedarf der dritte Punkt einer genaueren Erläuterung:

Wie bereits beschrieben ist der Filmträger auf beiden Seiten mit einer photographischen Emulsion beschichtet, sodaß auf

jeder Seite des Trägermaterials ein separates Bild entsteht. Das vom Leuchtkristall ausgesandte Licht trifft auf die der Folie anliegende lichtempfindliche Filmschicht, durchdringt das Trägermaterial von ca. 200 μm Dicke (1) und wirkt dann auf die gegenüberliegende photographische Emulsion ein. Dies bezeichnet man auch als "cross-over-Effekt" (Abb. 9). Der cross-over-Effekt kann sich nachteilig auf die Detailwiedergabe auswirken, da auf der der Leuchtschicht anliegenden Seite des Films zwar nur ein kleiner Bereich belichtet wird, auf der gegenüberliegenden Seite dagegen ein wesentlich größeres Feld.

Dies kann diagnostisch genutzt werden, indem man ein Röntgenbild am Leuchtkasten aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, wodurch sich für das Auge des Betrachters die beiden geschwärzten Schichten des Films gegeneinander verschieben.

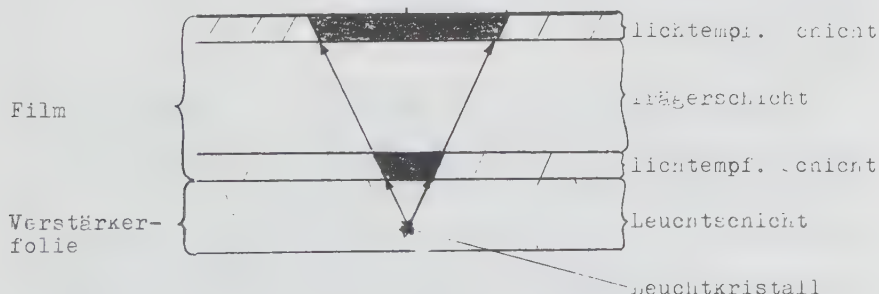


Abb. 9 Cross-over-Effekt

In letzter Zeit versucht man, den cross-over-Effekt durch das Anfärben des Filmträgermaterials zu unterdrücken (17). Der Film wird dadurch aber weniger empfindlich und benötigt eine höhere Strahlendosis bei Verwendung derselben Verstärkerfolie um die erforderliche gleiche Schwärzung zu erreichen.

Der Einfluß des Bindemittels, in das die Leuchtkristalle eingebettet sind, ebenso der Einfluß der Schutzschicht und der Haftschrift werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

An dieser Stelle noch eine Anmerkung zum Einfluß der Silberbromidkristalle im Film auf die Größe des einzelnen Schwärzungsflecks:

Wie bereits beschrieben, liegt der Durchmesser der Silberbromidkristalle bei ca. $1\text{ }\mu\text{m}$. Da der Durchmesser der Leuchtkristalle zwischen $2,5$ und $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt, wird deutlich, daß die Größe des einzelnen Schwärzungsflecks weit stärker vom Durchmesser der Leuchtkristalle abhängig ist als vom Durchmesser der lichtempfindlichen Silberbromidkristalle im Film (2, 3).

Die Farbe des Filmträgers hat insofern eine Bedeutung, als von ihr die Stärke des cross-over-Effekts abhängig ist, d.h. wie stark die Wirkung des vom Leuchtkristall ausgehenden Lichts auf der gegenüberliegenden Seite des Filmträgers ist. Je stärker der Filmträger angefärbt ist, umso geringer wird diese Wirkung sein, umso höher auch die Zeichenschärfe des Films, aber auch dessen Dosisbedarf (17).

2.2.3.3. Belegungsdichte der Verstärkerfolie mit Leuchtkristallen

- Verschiedene Arten von Verstärkerfolien
in Bezug auf ihre Lichtausbeute

Unter der Belegungsdichte versteht man den Leuchtstoffgehalt einer Verstärkerfolie. Sie wird als Leuchtstoffmenge pro Flächeneinheit in Milligramm pro Quadratcentimeter angegeben. Für handelsübliche Folien liegt die Belegungsdichte bei 10 bis 120 mg/cm² (1, 3, 15).

Die Lichtausbeute einer Folie wächst mit steigender Belegungsdichte bis zu einem bestimmten Wert an und nimmt bei höheren Belegungsdichten wieder ab, da die Leuchtschicht dann zu dick wird und einen Großteil des emittierten Lichts selbst wieder absorbiert. Nach Angerstein und Plapperer (3) liegt dieser Wert für CaWO₄-Folien bei 50 mg/cm², während ihn Degenhardt und Mitarb. mit 90 bis 110 mg/cm² angeben (15).

Mit zunehmender Lichtausbeute der Folie sinkt gleichzeitig die Bildqualität bei Verwendung des gleichen Leuchtstoffs.

Es ergeben sich demzufolge zwei Möglichkeiten:

Legt man Wert auf eine genaue Wiedergabe der Objektdetails, so wählt man eine Folie mit relativ geringer Belegungsdichte und nimmt eine höhere Strahlendosis in Kauf, die Nachteile wie z.B. lange Belichtungszeiten mit sich bringt.

Möchte man dagegen die applizierte Strahlendosis und die Belichtungszeit möglichst gering halten, so entscheidet man sich für eine Folie mit hoher Belegungsdichte.

Die Folienhersteller tragen dem Rechnung, indem sie mehrere Folientypen einer Leuchtstoffart anbieten.

Von den meisten Herstellern werden drei Typen gefertigt:

- Hochverstärkende Folien
- Universalfolien
- Feinzeichnende Folien

Alle drei Arten eines Foliensystems enthalten den gleichen Leuchtstoff, der oft bei allen drei Typen denselben durchschnittlichen Kristalldurchmesser aufweist (1). Die Folien unterscheiden sich vor allem durch ihre Belegungsdichte mit Leuchtkristallen. Diese nimmt von der hochverstärkenden zur feinzeichnenden Folie hin ab. Die feinzeichnende Folie hat den höchsten Dosisbedarf, während die hochverstärkende Folie den geringsten Dosisbedarf zur Erzielung der gleichen Filmschwärzung aufweist. Andererseits ist die Detailerkennbarkeit bei gleichem Film mit der feinzeichnenden Folie am höchsten, mit der hochverstärkenden am niedrigsten. Die Universalfolien stellen einen Kompromiß zwischen den beiden Extremen dar.

Außer in der Belegungsdichte unterscheiden sich die drei Folientypen in weiteren Parametern:

- Bindemittel
- Haftschicht
- Schutzschicht

Für die folgenden Abschnitte 2.2.3.4. , 2.2.3.5. und 2.2.3.6. gilt der Grundsatz, daß alles, was zur Verkleinerung des vom einzelnen Leuchtkristall im Film geschwärzten Areals beiträgt, zu einer Erhöhung der Bildqualität führt.

2.2.3.4. Das Bindemittel, in das die Leuchtkristalle eingebettet sind

Da die Leuchtkristalle weder unter sich noch mit dem Folienträger eine mechanische Verbindung zeigen, ist es notwendig, sie mit einer flüssigen Substanz, die später erstarrt, zu einer "Leuchtemulsion" zu verarbeiten. Diese Emulsion läßt sich in der gewünschten Dicke auf den Folienträger aufbringen. Wichtig ist dabei, daß die Leuchtschicht an allen Stellen die gleiche Dicke aufweist, da andernfalls die Schwärzung im Film bei homogener Bestrahlung des Aufnahmesystems örtliche Schwankungen zeigen würde. Diese Schwankungen könnten sich bei einer Aufnahme den durch das Aufnahmeobjekt verursachten Schwärzungsschwankungen überlagern und so zu Fehldeutungen durch den Radiologen führen.

Das Bindemittel, in das die Leuchtstoffkristalle eingebettet werden, besteht aus transparentem Material (Kunstharz, Gelatine, Kunststofflacke (1)), dem mehr oder weniger Farbstoff zugesetzt wird.

2.2.3.4.1. Farbe des Bindemittels

Dem Bindemittel wurde erstmals von Hartmann im Jahre 1930 ein Farbstoff zugesetzt, der das Licht derjenigen Wellenlänge schwächt, die vom Leuchtstoff emittiert wird (14).

In Abhängigkeit von der Höhe des Farbstoffzusatzes ändert sich die Reichweite des vom einzelnen Leuchtkristall ausgesandten Lichts. Dies hat einen Einfluß auf die Größe des Schwärzungsflecks im Film (Abb. 10).

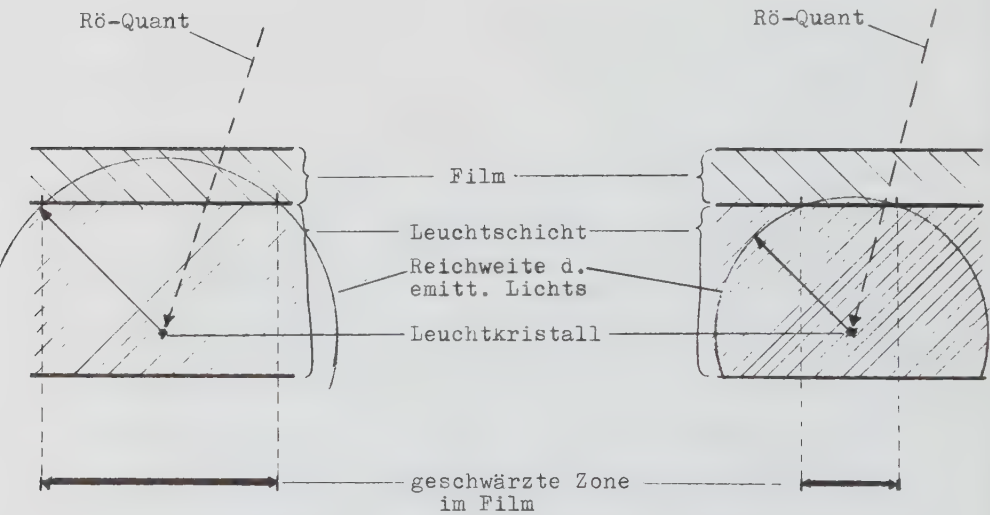


Abb. 10a helles Bindemittel Abb. 10b dunkles Bindemittel

Die Abb. 10a und 10b zeigen zwei Leuchtkristalle, die gleich weit vom Film entfernt sind. In einem hellen Bindemittel (Abb. 10a) hat das vom Kristall emittierte sichtbare Licht eine höhere Reichweite als in einem dunklen Bindemittel (Abb. 10b), d.h. der resultierende geschwärzte Fleck im

Film ist bei hellem Bindemittel größer als bei dunklem. Das bedeutet, daß zur Erzielung der gleichen Filmschwärzung bei dunklem Bindemittel eine höhere Strahlendosis erforderlich ist. Es bedeutet aber auch, daß mit dem Abdunkeln des Bindemittels die Zeichenschärfe der Film-Folien-Kombination ansteigt ("Lichthofschutz" nach Angerstein/Gursky (2)). Die Erkennbarkeit kleiner Objektdetails im Röntgenbild ist bei dunklem Bindemittel größer als bei hellem.

2.2.3.4.2. Mengenverhältnis Bindemittel - Kristalle

Für die mechanische Beanspruchbarkeit einer Folie ist ein bestimmtes Maß an Bindemittel erforderlich, wird es unterschritten, so sinkt die Haltbarkeit der Folie (12). Der Bindemittelanteil bei handelsüblichen Folien beträgt ca. 9 bis 10 Gewichts- % der Leuchtschicht, d.h. das Gewichtsverhältnis Leuchtstoff : Bindemittel beträgt etwa 9:1 (12, 30).

Abb. 11 zeigt zwei Leuchtschichten von Verstärkerfolien, die dieselbe Belegungsichte aufweisen, aber im Bindemittelanteil unterschiedlich sind.

Sinkt der Anteil des Bindemittels in der Leuchtschicht, so nimmt bei gleichbleibender Belegungsichte auch die Dicke der Leuchtschicht ab. Die Packung der Leuchtkristalle wird dichter, der Abstand zwischen den Kristallen nimmt ab.

Da die Wegstrecke, die das vom Kristall ausgesandte Licht zurücklegt, kürzer wird, wird es nicht so stark geschwächt. Das bedeutet, daß der Dosisbedarf der Folie sinkt.

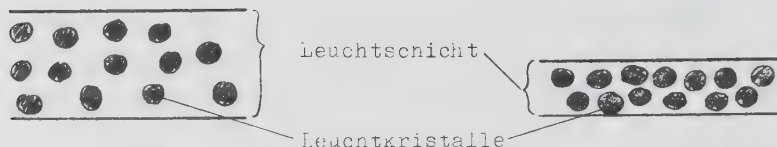


Abb. 11a

hoher Bindemittelanteil

Abb. 11b

geringer Bindemittelanteil

Abb. 11 Änderung des Bindemittelanteils der Leuchtschicht

Da der Abstand der Leuchtkristalle zur lichtempfindlichen Schicht des Films durch Verringerung des Bindemittelanteils kleiner wird, verringert sich auch die Größe des vom einzelnen Kristall belichteten Filmflecks und damit steigt wie bereits beschrieben die Bildqualität (siehe dazu auch Abb. 13). Ein niedriger Bindemittelanteil bringt demnach nur Vorteile, solange die mechanische Belastbarkeit und die Haltbarkeit nicht zu gering werden.

2.2.3.5. Die Haftschrift

Die mechanische Verbindung zwischen der Leuchtschicht und dem Folienträger stellt die Haftschrift her. Ihre Dicke ist weder für den Dosisbedarf noch für die Bildqualität einer Film-Folien-Kombination von wesentlicher Bedeutung. Wichtig ist dagegen ihre Farbe, die man durch Zugabe von verschiedenen Farbstoffen zur Grundsubstanz erreicht.

Färbt man die Haftschrift hell ein, so wird das von den Leuchtkristallen emittierte Licht an ihr reflektiert und trägt mit zur Filmschwärzung bei.

Färbt man die Haftschrift dunkel ein, so wird das vom Leuchtkristall kommende Licht absorbiert und nur das direkt vom Kristall in Richtung auf den Film austretende Licht führt zu einer Schwärzung. Die Lichtausbeute einer Folie ist umso größer, je mehr Licht von der Haftschrift reflektiert wird. Hochverstärkende Folien mit niedrigem Dosisbedarf besitzen aus diesem Grund eine hell eingefärbte Haftschrift. Die Nachteile heller Haftschriften verdeutlicht Abb. 12.

Bei Verwendung einer hellen Haftschrift ist der vom einzelnen Leuchtkristall geschwärzte Filmfleck größer als bei dunkler Haftschrift. Allgemein gilt: Je dunkler die Haftschrift, umso besser ist die mit dieser Folie erreichbare Zeichenschärfe, umso höher ist aber auch ihr Dosisbedarf.

In letzter Zeit wird es durch die Verwendung von Polyester als Folienträger möglich, den Träger selbst einzufärben und auf die Haftschrift zu verzichten (25).

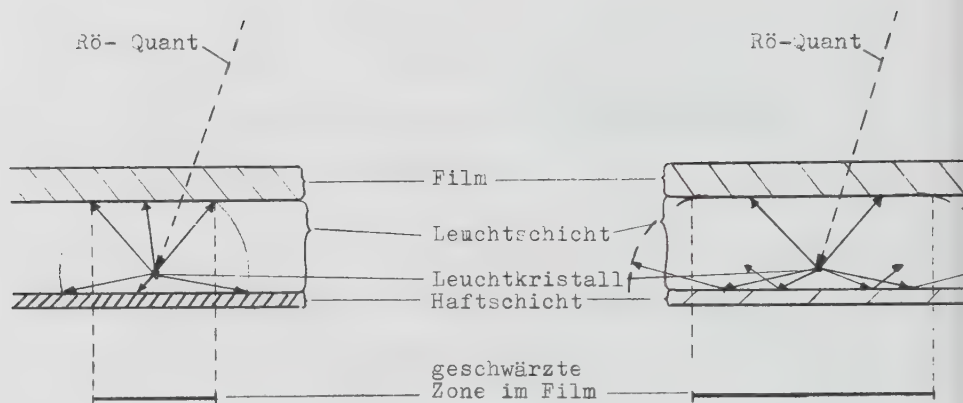


Abb. 12a
dunkle Haftschicht
(lichtabsorbierend)

Abb. 12b
helle Haftschicht
(lichtreflektierend)

Abb. 12 Einfluß der Farbe des Haftschichtmaterials
auf die vom einzelnen Leuchtkristall
geschwärzte Filmfläche

2.2.3.6. Die Schutzschicht

Um die Leuchtkristalle vor mechanischen und chemischen Einwirkungen zu schützen, überzieht man die Leuchtschicht mit einer Schutzschicht aus transparentem Kunstharz oder mit Kunststofflacken (1, 30). Variabel ist die Farbe und die Dicke der Schutzschicht.

Für die Farbe der Schutzschicht gilt im wesentlichen das in Abschnitt 2.2.3.4.1. Gesagte, nämlich, daß mit der

stärkeren Einfärbung der Schutzschicht die Bildqualität ansteigt und die Lichtausbeute abnimmt. Dies ist wiederum auf die Verkleinerung des vom einzelnen Leuchtkristall geschwärzten Filmareals zurückzuführen.

Die Dicke der Schutzschicht liegt bei handelsüblichen Folien zwischen 10 und 20 μm (12, 30). Je dicker die Schutzschicht ist, umso größer wird der Abstand Leuchtkristall - photographische Schicht und damit das vom einzelnen Kristall belichtete Filmareal (Abb. 13).

Die Abbildung der Objektdetails wird ungenauer, da sich die "Lichthöfe" der einzelnen Leuchtkristalle stärker überlappen.

Degenhardt (12) sieht in der Dicke der Schutzschicht den limitierenden Faktor für die Abbildung kleiner Objektdetails bzw. das Auflösungsvermögen im Röntgenbild.

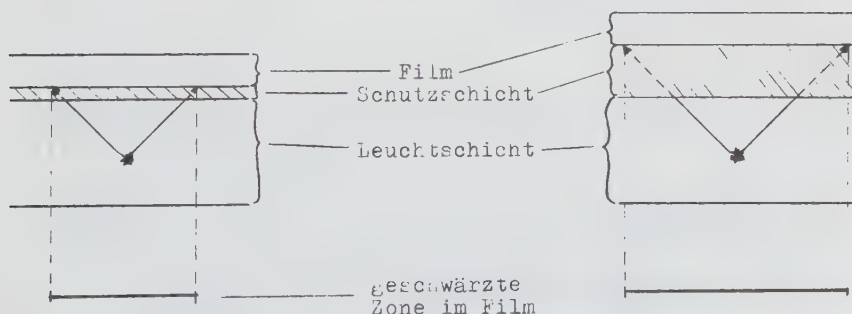


Abb. 13a
dünne Schutzschicht

Abb. 13b
dicke Schutzschicht

Abb. 13 Einfluß der Dicke der Schutzschicht auf die Größe des Schwärzungsflecks im Film

2.3. Die wichtigsten Ursachen der Unschärfe im Röntgenbild

"Der Begriff der Unschärfe ist eine zusammenfassende Bezeichnung für die mehr oder weniger deutlich ausgeprägte Verwaschung der Objektkonturen im Bild. Photometrisch drückt sich Unschärfe in verflachten Schwärzungsübergängen aus"(Zitat aus (1)).

Je größer das Ausmaß der Unschärfe ist, umso geringer wird die Bildqualität beurteilt. Die wichtigsten Ursachen der Unschärfe im Röntgenbild sind:

- die Bewegungsunschärfe
- die geometrische Unschärfe
- die Materialunschärfe der Film-Folien-Kombination
- die Quantennatur der Röntgenstrahlung

2.3.1. Bewegungsunschärfe

Sie wird durch das Aufnahmeobjekt verursacht und tritt nur bei Objekten auf, die sich entweder innerlich oder äußerlich in Bewegung befinden. Um dem negativen Einfluß der Bewegungsunschärfe zu begegnen, verwendet man unterschiedlich empfindliche Verstärkerfolien, je nach der Geschwindigkeit der bei der Aufnahme zu erwartenden Bewegungen.

Bei schnellen Bewegungen benützt man hochverstärkende Folien, um die Belichtungszeit möglichst gering zu halten.

Grundsätzlich läßt sich feststellen: Je schneller die Bewegung und je unempfindlicher Folie und Film sind, umso stärker wirkt sich die Bewegungsunschärfe im Bild aus.

2.3.2. Geometrische Unschärfe

Sie wurde bereits in Abschnitt 2.1.2.1.6. behandelt und in ihren Auswirkungen in Abb. 2 dargestellt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die geometrische Unschärfe umso größer ist, je größer der Brennfleck der Röntgenröhre und je kleiner der Fokus-Film-Abstand ist.

2.3.3. Materialunschärfe der Film-Folien-Kombination

Als Materialunschärfe bezeichnet man den Anteil der Unschärfe im Bild, der durch die Eigenschaften des verwendeten Film-Folien-Systems verursacht wird.

Auf die Materialunschärfe haben folgende Faktoren einen Einfluß:

- Die Größe der lichtempfindlichen Silberbromid-Partikel im Film
- Die Größe der Leuchtkristalle in der Verstärkerfolie
- Die Lichtausbeute der Leuchtkristalle
- Die Entfernung der Leuchtkristalle von der lichtempfindlichen Schicht des Films

Auch in diesem Zusammenhang gilt wieder, daß die Unschärfe umso größer wird, je größer das vom einzelnen Leuchtkristall geschwärzte Filmareal ist.

Die Größe der Silberbromid-Partikel ist von geringem Einfluß, da ihr Durchmesser ca. $1\text{ }\mu\text{m}$ beträgt, während der Durchmesser der Leuchtkristalle in der Folie zwischen $2,5$ und $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt.

Der Durchmesser der Leuchtkristalle und ihre Lichtausbeute bestimmen neben dem Abstand der Kristalle zur lichtempfindlichen Filmschicht das Maß der Materialunschärfe einer Film-Folien-Kombination. Mit zunehmender Größe eines oder mehrerer dieser drei Faktoren wächst auch die Materialunschärfe.

2.3.4. Quantennatur der Röntgenstrahlung

Wie bereits beschrieben ist ein Quant der kleinste denkbare Anteil der Röntgenstrahlung.

Betrachtet man ein ausreichend langes Zeitintervall, so darf man annehmen, daß alle Teilstücke einer Film-Folien-Kombination etwa gleich häufig von Quanten getroffen werden. Je geringer die Gesamtzahl der pro Flächeneinheit auftreffenden Röntgenquanten ist, desto weniger wahrscheinlich wird es, daß jedes Flächenstück mit gleicher Häufigkeit getroffen wird (1).

Die Gesamtzahl der pro Flächeneinheit auftreffenden Quanten hängt von der Empfindlichkeit des verwendeten Film-Folien-Systems ab. Bei Verwendung höchstverstärkender Folien und sehr empfindlicher Filme kann es dazu kommen, daß die Quantenverteilung im Röntgenbild als verstärkte Körnigkeit

sichtbar wird, da zur Erzielung einer ausreichenden Filmschwärzung nur mehr sehr wenige Quanten pro Flächeneinheit notwendig sind (Quantenrauschen nach Angerstein (1)). Je geringer der Dosisbedarf einer Film-Folien-Kombination ist, umso stärker kann sich dieser Effekt auf die Bildschärfe auswirken.

2.4. Verschiedene Verfahren des Qualitätsvergleichs von Film-Folien-Systemen

Im Vorangegangenen wurden die chemischen und physikalischen Eigenschaften und damit die möglichen Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Teile des Abbildungssystems beschrieben. Erst die Summe aller Eigenschaften und ihrer gegenseitigen Abhängigkeit erlaubt eine Aussage über die Qualität. Nur wenn alle positiven Eigenschaften optimal genutzt und die negativen Eigenschaften eliminiert werden, ist mit einem Abbildungssystem eine maximale Bildqualität bei minimaler Strahlenbelastung zu erreichen.

Für die Praxis erscheint es deshalb wenig sinnvoll, die Eigenschaften des Leuchtstoffs, der Folien und der Filme getrennt zu untersuchen. Erst der Vergleich zwischen gesamten Film-Folien-Systemen erlaubt eine Aussage über die für dieses System optimalen Aufnahmedaten (Röhrenspannung, Dosisbedarf) und die damit erreichbare Bildqualität. Verwendet man beispielsweise einen blau-empfindlichen Röntgenfilm mit einer grün-emittierenden Verstärkerfolie,

so ist für diese Kombination ein höherer Dosisbedarf zu erwarten als für die Kombination des blau-empfindlichen Films mit einer blau-emittierenden Folie.

Um Vergleiche zwischen den einzelnen Film-Folien-Systemen durchführen zu können, ist es notwendig, Wege zu einer Bewertung des jeweiligen Abbildungssystems zu finden. Nach Richter, Angerstein und Steinhart (54) gibt es im wesentlichen drei Möglichkeiten, Film-Folien-Systeme zu vergleichen:

- Subjektive Verfahren
- Halbobjektive Verfahren
- Objektive Verfahren

2.4.1. Merkmale, in denen sich die einzelnen Verfahren unterscheiden

Die Röntgendiagnostik mit Film-Folien-Systemen gliedert sich in zwei Vorgänge:

- Die Herstellung der Röntgenaufnahme
- Die Auswertung des Röntgenbildes durch den Radiologen

Verfahren zum Qualitätsvergleich können sich in beiden Bereichen unterscheiden:

Sowohl für die Herstellung als auch für die Auswertung eines Röntgenbildes zum Qualitätsvergleich können verschiedene Verfahren herangezogen werden. So können normierte oder nicht normierte Aufnahmeobjekte verglichen

werden und diese wiederum können mit dem menschlichen Auge oder mit einem technischen Hilfsmittel, beispielsweise dem Mikrodensitometer, ausgewertet werden.

2.4.1.1. Normierung des abzubildenden Objekts

Die Verfahren zum Qualitätsvergleich von Film-Folien-Systemen verwenden zum einen nicht normierte Abbildungsobjekte wie z.B. das Patientengut, oder normierte Objekte, die zur Untersuchung einer definierten Eigenschaft eines Film-Folien-Systems dienen. So werden zur Ermittlung des Auflösungsvermögens eines Systems Bleistrichraster mit zunehmender Anzahl von Linienpaaren pro Millimeter verwendet. Anwendung finden zu diesem Zweck auch Bohrungen von abnehmendem Durchmesser in unterschiedlichen Testkörpern wie Metallplatten und Knochenstücken.

2.4.1.2. Auswertung des fertigen Röntgenbildes

Die Auswertung des Bildes kann durch das Auge des Radiologen oder mit Hilfe eines technischen Gerätes erfolgen.

2.4.1.2.1. Auswertung durch das menschliche Auge

Grundvoraussetzung für die Bildbeurteilung durch den Menschen ist die ausreichende Erfahrung des einzelnen Radiologen. Wegen der physiologischen und psychologischen Faktoren, die in die Bildauswertung eingehen, läßt dieses

Verfahren keine allgemein gültigen Aussagen zu.

Erst die Auswertung durch ein größeres Betrachterkollektiv ermöglicht statistische Feststellungen zur Bildqualität eines Film-Folien-Systems (54).

2.4.1.2.2. Auswertung mit Hilfe des Mikrodensitometers

Das Verfahren der Mikrodensitometrie erlaubt die objektive und reproduzierbare Messung und Darstellung von Schwärzungsunterschieden im Röntgenbild. Der entwickelte Röntgenfilm wird dabei in einen Lichtstrahl gebracht, dessen Intensität vor und nach dem Durchtritt durch den Film gemessen wird. Das Gerät ermittelt hieraus die Schwärzung des Films an der beleuchteten Stelle. Bewegt man den Film gleichmäßig im Lichtstrahl des Densitometers, und überträgt man die gemessenen Schwärzungswerte auf einen x-y-Schreiber, so erhält man eine Kurve der Schwärzungsverteilung im Röntgenbild.

Liegt der Durchmesser des Lichtstrahls in Filmebene im cm^2 -Bereich, so spricht man von Densitometrie, liegt er im mm^2 -Bereich, so bezeichnet man das Verfahren als Mikrodensitometrie und die erhaltenen Schwärzungskurven als Mikrodensitogramme.

2.4.2. Subjektives Verfahren

Die subjektiven Verfahren des Qualitätsvergleichs bedienen sich nicht normierter Aufnahmeobjekte und der Auswertung des Röntgenbildes durch das Auge des Radiologen:

2.4.2.1. Auswertung des Röntgenbildes durch das menschliche Auge

Um aussagekräftige Ergebnisse über die diagnostische Qualität eines Film-Folien-Systems zu erhalten, ist ein großes Betrachterkollektiv von erfahrenen Radiologen notwendig. Dieses Kollektiv beurteilt eine große Anzahl von Röntgenbildern, die mit Hilfe dieses Aufnahmesystems hergestellt wurden, nach subjektiven Gesichtspunkten, die von Radiologe zu Radiologe unterschiedlich sein können. Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, daß nur eine vergleichende Betrachtung zwischen verschiedenen Systemen möglich ist.

2.4.2.2. Abzubildende Objekte nicht normiert

In der Praxis bedeutet dies , daß der einzelne Radiologe z.B. Thoraxaufnahmen, die mit Hilfe des Film-Folien-Systems A hergestellt wurden, mit anderen Thoraxaufnahmen vergleicht, die mit dem Film-Folien-System B hergestellt wurden. Das von einem großen Betrachterkollektiv festgelegte Ergebnis besitzt nur statistischen Wert, da das ermittelte "beste" Verfahren für einen bestimmten Radiologen weniger zur

Diagnosestellung geeignet sein kann als ein vom Kollektiv qualitativ niedriger bewertetes System.

2.4.3. Halbobjektive Verfahren

Die Auswertung des Röntgenbildes erfolgt wie bei den subjektiven Verfahren durch das menschliche Auge, die abzubildenden Objekte werden jedoch normiert:

2.4.3.1. Auswertung des Röntgenbildes durch das menschliche Auge

Der Betrachter bestimmt bei diesen Verfahren die Größe bzw. die Anzahl der für ihn gerade noch erkennbaren bzw. unterscheidbaren Einzelheiten.

Auch bei diesen Verfahren ergeben sich auf Grund der physiologischen und psychologischen Eigenschaften des einzelnen Radiologen bei verschiedenen Betrachtern unterschiedliche Ergebnisse.

2.4.3.2. Normierung der abzubildenden Objekte

Die halbobjektiven Verfahren des Qualitätsvergleichs bedienen sich der Auflösungsfähigkeit als Meßgröße.

Verwendet werden dazu:

- Bohrungen von abnehmendem Durchmesser in unterschiedlichen Testkörpern (Metallplatten, Knochenstücke).

Der Betrachter bestimmt dabei die Größe der Bohrung, die er bei Verwendung eines bestimmten Film-Folien-Systems

gerade noch erkennen kann.

- Bleistrichraster mit zunehmender Anzahl von Linien pro Millimeter. Jeweils eine dunkle Linie und eine helle Linie im Röntgenbild werden als Linienpaar zusammengefaßt. Der Betrachter bestimmt diejenige Anzahl von Linienpaaren pro Millimeter (LP/mm), die für ihn beim jeweiligen Abbildungssystem noch unterscheidbar ist.

2.4.4. Objektive Verfahren

Die objektiven Untersuchungsverfahren für Film-Folien-Systeme ersetzen den Menschen als Bildbetrachter durch das mit einem x-y-Schreiber verbundene Mikrodensitometer. Es werden nur normierte Abbildungsobjekte untersucht. Die Schwierigkeiten bei diesen Verfahren liegen darin, die Mikrodensitogramme richtig zu interpretieren. Es besteht noch Unklarheit darüber, welche qualitativen Anforderungen an die Meßgenauigkeit gestellt werden müssen, um die Aussagen über ein normiertes Objekt auf Praxisbedingungen übertragen zu können.

2.4.4.1. Auswertung des Röntgenbildes durch das Mikrodensitometer

Zur Ausschaltung der physiologischen und psychologischen Faktoren, die bei der Beurteilung des Abbildungssystems durch den Radiologen entstehen, verwendet man das Mikrodensitometer, das objektive und reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Die mit Hilfe der verschiedenen Film-Folien-Systeme gewonnenen Bilder werden mit gleichbleibender Geschwindigkeit in einem Lichtstrahl von gleichbleibendem Durchmesser bewegt. Da sich das abgebildete Objekt nicht verändert, lassen die angefertigten Mikrodensitogramme Rückschlüsse auf die Qualität des verwendeten Abbildungssystems zu.

2.4.4.2. Normierung der abzubildenden Objekte

Zur Untersuchung der einzelnen Eigenschaften der Film-Folien-Systeme wie Auflösungsvermögen, Bildkontrast, Bildschärfe und Rauschen werden unterschiedliche, aber beim jeweiligen Verfahren normierte Aufnahmeobjekte verwendet.

Für die Bestimmung des Auflösungsvermögens benützt man Bleistrichraster, Aussagen zu Bildkontrast und Bildschärfe macht man mittels Abbildung scharfer Kanten und schmaler Spalte durch das jeweilige Film-Folien-System.

Das Phänomen des Rauschens untersucht man an homogen geschwärzten Filmabschnitten.

2.4.4.2.1. Messung des Auflösungsvermögens mittels Bleistrichraster

Mit Hilfe des zu untersuchenden Film-Folien-Systems bildet man Bleistrichraster ab, die aus dicht nebeneinander liegenden Bleilamellen bestehen. Der Abstand der Lamellen zueinander ist gleich der Breite der Lamellen.

Im Röntgenbild resultiert eine Aufeinanderfolge von schwarzen und weißen Linien. Jeweils eine schwarze und eine weiße Linie werden als Linienpaar bezeichnet.

Um das Auflösungsvermögen eines Systems zu bestimmen, verwendet man Bleistrichraster mit zunehmender Anzahl von Linienpaaren pro Millimeter. Als Auflösungsvermögen gibt man die Anzahl der im Bild gerade noch erkennbaren LP/mm an. Beim halbobjektiven Verfahren der Bildqualitätsbeurteilung liest man das Auflösungsvermögen mit dem bloßen Auge oder mit Hilfe von Vergrößerungslinsen ab.

Beim objektiven Verfahren werden die Röntgenbilder des Bleistrichrasters einer Mikrodensitometrie unterzogen. Es ergibt sich eine rechteckförmige Kurve, deren Amplitude und Wellenlänge mit steigender Anzahl von LP/mm abnimmt. Ab einer bestimmten Zahl von LP/mm ist im Mikrodensitogramm keine durch das Raster verursachte regelmäßige Kurve mehr zu erkennen. Das Auflösungsvermögen liegt also unter diesem Wert.

Das Auflösungsvermögen läßt sich auch aus der sogenannten Modulationsübertragungsfunktion ablesen (1).

"Die Modulationsübertragungsfunktion oder kurz MÜF ist ein Maß dafür, wie Kontraste im Strahlenbild auf den entwickelten Röntgenfilm übertragen werden, und zwar in Abhängigkeit von der Detailgröße " (Zitat aus (1)).

Je größer das Auflösungsvermögen eines Aufnahmesystems ist, umso besser ist auch die mit diesem System erreichbare Bildqualität. Das höchste Auflösungsvermögen besitzen Filme,

die ohne Verstärkerfolien verwendet werden, beispielsweise Zahnfilme. Das Auflösungsvermögen nimmt bei Film-Folien-Kombinationen von den feinzeichnenden zu den hochverstärkenden Systemen hin ab.

2.4.4.2.2. Messung von Bildkontrast und Bildschärfe mittels scharfer Kanten und schmaler Spalte

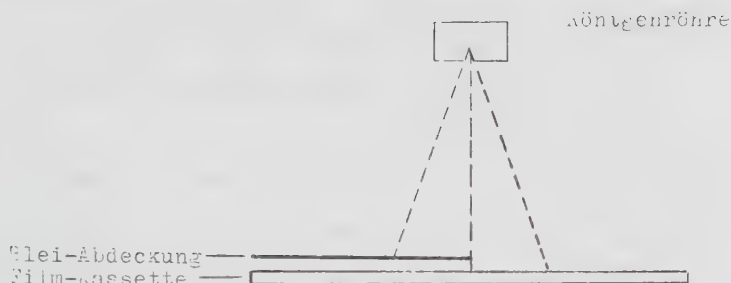
Es werden zunächst Teile der Röntgenkassette mit Blei oder einem ähnlich röntgendichten Material abgedeckt. Anschließend wird die Kassette belichtet und der Film entwickelt.

In Abhängigkeit von der Abdeckung der Kassette ergeben sich im Bild unterschiedliche Schwärzungsintensitäten. Bei der Abbildung von scharfen Bleikanten ergibt sich im Röntgenbild ein Übergang von einer sehr stark geschwärzten zu einer nahezu ungeschwärzten Fläche.

Enge, von Blei begrenzte Spalte stellen sich als schmale schwarze Striche dar.

Die Mikrodensitogramme dieser Schwärzungsübergänge erlauben Rückschlüsse auf den Bildkontrast und die Bildschärfe des jeweiligen Abbildungssystems.

Abb. 14 zeigt die Anordnung zur Darstellung einer scharfen Bleikante und das Mikrodensitogramm des zugehörigen Röntgenfilms. Verschiedene Autoren haben beschrieben, daß der Übergang von der Schwärzung Null im Densitogramm zum Maximalwert der Schwärzung in diesen Aufnahmen umso flacher verläuft, je geringer die Bildschärfe ist (22, 45).



zugehöriges Densitogramm:

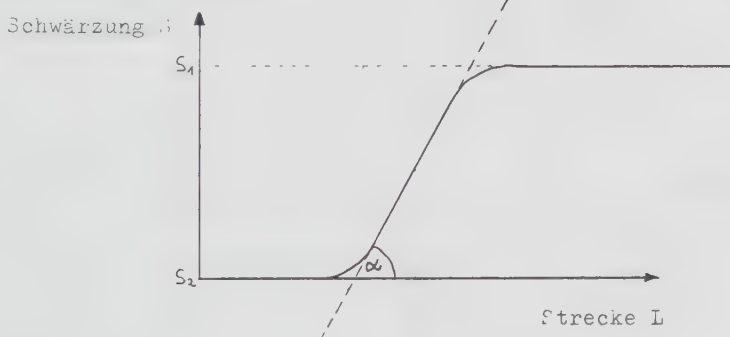


Abb. 14 Abbildung einer scharfen Blei-Kante
(modifiziert nach Frommhold (22))

Je schärfer also eine Röntgenaufnahme ist, umso größer ist auch der Winkel α in Abb. 14. Im allgemeinen ist der Schwärzungsverlauf umso steiler, je höher der Dosisbedarf eines Abbildungssystems ist. Die größte Bildschärfe ist mit einem folienlosen Film zu erreichen. Sie nimmt über die feinzeichnenden bis zu den hochverstärkenden Film-Folien-Systemen hin ab.

Das in Abb. 14 dargestellte Densitogramm der Röntgenaufnahme einer scharfen Kante entspricht nicht dem subjektiven Eindruck beim Betrachten des Bildes.

"An der Grenzlinie zwischen zwei Graufeldern unterschiedlicher Schwärzung ist der subjektiv empfundene Kontrast größer als der photometrisch meßbare. Nahe der Grenzlinie wird das dunkle Feld für das menschliche Empfinden dunkler, das helle wird heller als das übrige Feld." (1)

Dieses Phänomen wird als Mach'scher Effekt bezeichnet.

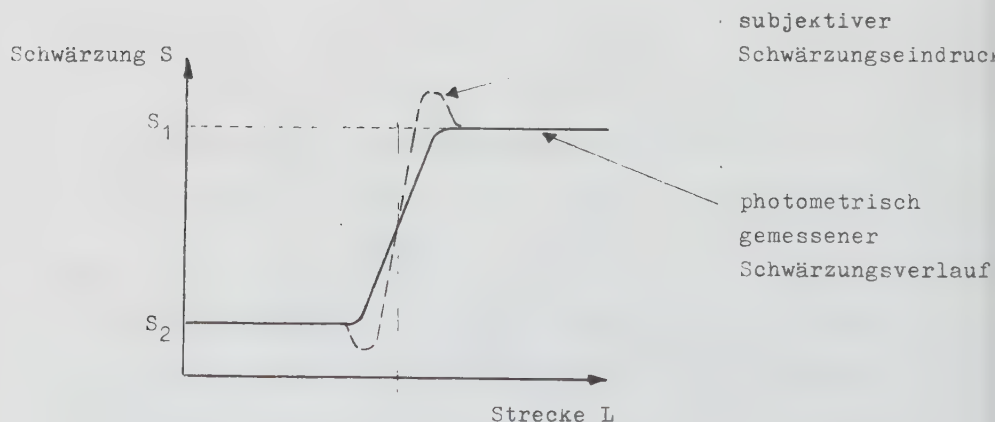


Abb. 15 Der Mach'sche Effekt, dargestellt an der Abbildung einer scharfen Kante (in Anlehnung an Angerstein (1))

Unter Kontrast versteht man in der Röntgenaufnahmetechnik jene physikalische Größe, die den Schwärzungs- oder Leuchtdichteunterschied zweier benachbarter Punkte oder Flächen eines Bildes beschreibt.

Angerstein (1) definiert den Kontrast K als Quotient aus der Differenz der Schwärzungswerte der beiden zu vergleichenden Flächen und der Summe dieser Schwärzungswerte:

$$K = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}$$

Gibt man den Wert K für die hellste und die dunkelste Stelle einer Röntgenaufnahme an, so spricht man nach Angerstein (1) vom Maximalkontrast oder vom Kontrastumfang des Bildes. Ein Detail im Röntgenbild ist umso leichter zu erkennen, je größer sein Kontrast zur Umgebung ist und je schärfer seine Umrisse abgebildet werden.

Legt man zwei Bleiplatten dicht nebeneinander auf die Röntgenkassette, so bleibt zwischen ihnen nur ein schmaler Spalt für die Röntgenstrahlung durchlässig. Einige Autoren beschreiben Untersuchungen an Film-Folien-Systemen mit Hilfe dieser schmalen Spalte (5, 22, 47).

Wählt man den abzubildenden Spalt genügend klein (0,2 mm nach Frommhold (22)), so beeinflussen sich die beiden Spaltränder gegenseitig:

Betrachtet man beispielsweise die Abbildung einer scharfen Kante mit einem hochverstärkenden Film-Folien-System, so wird die Kante relativ unscharf abgebildet, d.h. der Winkel α in Abb. 14 wird relativ klein, der Schwärzungsverlauf relativ flach.

Nähert man nun zwei Kanten einander soweit, daß sich der Unschärfebereich ihrer Abbildungen überlappt, so kommt es

zu einer Verringerung des erreichbaren Kontrastes.

In Abb. 16 ist die Untersuchungsanordnung mit einem schmalen Spalt und das zugehörige Densitogramm dargestellt.

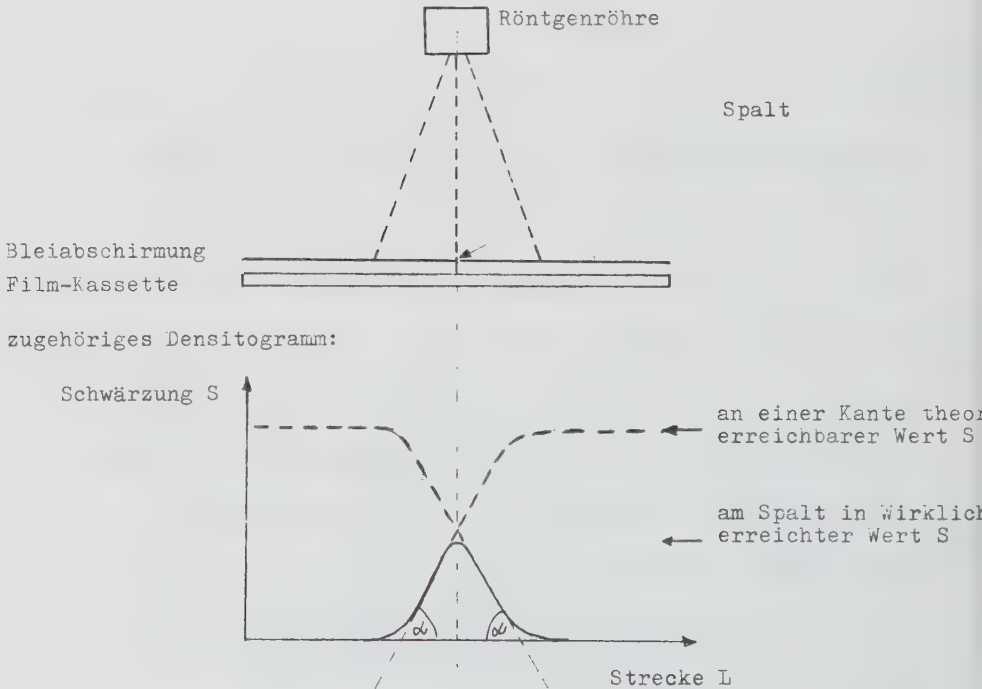


Abb. 16 Die Abbildung eines schmalen Spalts und das Densitogramm des zugehörigen Röntgenbildes (modifiziert nach Frommhold (22))

Es zeigt sich, daß der in Wirklichkeit photometrisch gemessene Wert der Schwärzung im Spaltbereich geringer ist als der theoretisch an einer einzelnen Kante erreichbare

Schwärzungswert. Je geringer die mit einem System erreichbare Bildschärfe ist, umso kleiner ist auch der Winkel α und damit der Kontrast des Spaltbildes gegenüber seiner Umgebung.

Wählt man die Unschärfe genügend groß und die Spaltbreite ausreichend klein, so stellt sich der Spalt im Röntgenbild nicht mehr dar.

Eine praktische Anwendung: Mit höchstverstärkenden Film-Folien-Systemen sind unter Umständen schmale Frakturenspalte nicht zu erkennen.

2.4.4.2.3. Messung des Rauschens an homogen belichteten Röntgenfilmen

Betrachtet man einen gleichmäßig belichteten Röntgenfilm nach der Entwicklung aus größerer Entfernung (Leseabstand), so nimmt das menschliche Auge einen homogenen Grauschleier wahr. Bedient man sich jedoch einer Vergrößerungslinse, so erkennt man, daß der Grauschleier aus einzelnen, kleinen Schwärzungsflecken besteht.

Unterzieht man einen solchen Film einer mikrodensitometrischen Untersuchung, so ergibt sich als Mikrodensitogramm eine Kurve von wechselnder Amplitude und Frequenz.

Die Schwärzung ist also nicht an allen Stellen des Films gleich, sondern sie unterliegt gewissen Schwankungen.

Analog zu den zeitlichen Stromschwankungen, die in der Elektrik bzw. Elektronik bei der Umsetzung des elektrischen Stromes in Schallwellen ein Rauschen verursachen, werden die

örtlichen Schwärzungsschwankungen im Röntgenbild ebenfalls als Rauschen bezeichnet (1, 54).

Das Rauschen ist besonders für die Erkennbarkeit kleiner Details im Röntgenbild von Bedeutung. Das Detail muß sich im Mikrodensitogramm in Amplitude und Frequenz ausreichend vom statistischen Rauschen des Abbildungssystems abheben, um vom menschlichen Auge im Bild erfaßt werden zu können.

Die mikrodensitometrischen Parameter eines Details wie Frequenz und Amplitude erlauben die Bestimmung seiner Größe, seines Kontrasts zur Umgebung und seine Abbildungsschärfe. Das unterschiedliche Verhalten der mikrodensitometrisch bestimmten Amplitude und Frequenz eines Details im Vergleich zu seiner homogenen (detaillosen) Umgebung wird als Signal-Rausch-Verhältnis oder Störabstand bezeichnet (1, 28, 48, 64).

Die Parameter, mit denen das Rauschen beschrieben werden kann, sind identisch mit jenen, die im Mikrodensitogramm ein Detail charakterisieren. Es handelt sich im einzelnen um:

- die Amplitude des Mikrodensitogramms als Maß für den Kontrastumfang des Rauschens
- die Frequenz als Maß für die Größe der einzelnen Schwärzungsflecken
- die Steigungswerte des Mikrodensitogramms als Maß für die Schärfe der Übergänge zwischen den Schwärzungsflecken (siehe Abb. 14)

Das hat zur Folge, daß das Rauschen nicht durch eine einzige Zahl angegeben werden kann.

2.4.4.2.3.1. Die wichtigsten Ursachen des Rauschens:

Die wichtigsten Faktoren, die an der Entstehung des Rauschens beteiligt sind, wirken sich auch auf die Unschärfe einer Röntgenabbildung aus und wurden deshalb auch bereits in den Abschnitten 2.3.3. und 2.3.4. beschrieben. Es handelt sich im wesentlichen um:

- die Filmkörnigkeit
- die Folienkörnigkeit
- die Röntgenquantenverteilung

Die Größe der lichtempfindlichen Silberbromidpartikel im Film liegt bei etwa $1\mu\text{m}$. Der durch sie verursachte Körnigkeitseindruck ist in jedem Fall geringer als der durch die wesentlich größeren Leuchtkristalle in der Folie hervorgerufene ($\varnothing 2,5 - 12\mu\text{m}$).

Neben der Größe des Leuchtkristalls sind auch seine Entfernung vom Film und seine Lichtausbeute für das Rauschen von Bedeutung. Beide Größen werden durch das Bindemittel der Folie, durch die Haftschrift und durch die Schutzschicht von Folie und Film beeinflusst (siehe Abschn. 2.2.3.4., 2.2.3.5. und 2.2.3.6.).

Bei sehr hochverstärkenden Systemen kann es zum sogenannten Quantenrauschen kommen. Im Vergleich mit feinzeichnenden Film-Folien-Systemen, die eine relativ hohe Dosis erfordern, wird die gleiche Filmschwärzung bei hochverstärkenden Systemen durch eine relativ geringe Anzahl von Röntgenquanten ausgelöst. Dies ist bedingt durch die hohe Licht-

ausbeute dieser Verstärkerfolien. Unterschreitet die Quantenanzahl pro Flächeneinheit einen gewissen Wert, so sind die "Einschläge" der einzelnen Quanten im Röntgenbild als Bestandteil des Rauschens zu erkennen.

Für die Detailerkennbarkeit im Röntgenbild erscheint es optimal, wenn das Rauschen mikrodensitometrisch dargestellt eine möglichst geringe Amplitude und eine möglichst niedrige Frequenz aufweist. Kleine und kontrastarme Details heben sich aus einem solchen Rauschen am besten ab.

In den Abschnitten 1. und 2. wurden die theoretischen Grundlagen dargestellt, die zum Verständnis der nun folgenden praktischen Untersuchungen an einigen handelsüblichen Film-Folien-Systemen erforderlich sind.

Bei den Untersuchungen wurden zunächst die Aufnahmedaten für die verschiedenen Systeme unter klinischen Bedingungen gemessen.

Anschließend kamen halbobjektive und objektive Verfahren zum Vergleich der einzelnen Eigenschaften der verschiedenen Systeme zur Anwendung.

3. Methode der Film-Folien-Untersuchung:

3.1. Verwendete Materialien und Geräte

Die Untersuchungen wurden in der Abteilung Röntgen A der Radiologischen Klinik und Poliklinik der Universität München im Klinikum Großhadern durchgeführt.

Folgende Film-Folien-Systeme und Geräte standen für vergleichende Untersuchungszwecke zur Verfügung:

3.1.1. Materialien:

3.1.1.1. Röntgen-Verstärkerfolien:

a. Folien mit CaWO_4 als Leuchtstoff :

- Siemens-Rubin
- Siemens-Spezial
- Siemens-Saphir

b. Folien auf der Basis seltener Erden :

- Folien, die blaues Licht emittieren :
 - CAWO-SE 1
 - CAWO-SE 2
 - CAWO-SE 4
 - CAWO-SE 6
 - Siemens-Titan U
 - Siemens-Titan HS
 - Siemens-Titanic
 - DU PONT-Quanta II

- Folien, die grünes Licht emittieren :

- 3M-Trimax $\propto$ 2
- 3M-Trimax $\propto$ 4
- 3M-Trimax $\propto$ 8
- 3M-Trimax $\propto$ 16

3.1.1.2. Röntgenfilme

Agfa-Gevaert Curix RP 1	- blauempfindlich ⁺⁺
3M-Trimax XM	- grünempfindlich ⁺⁺
3M-Trimax XD	- grünempfindlich ⁺⁺

⁺⁺ Angegeben ist jeweils die Farbe des Lichts, für das der Film empfindlich ist.

3.1.1.3. Untersuchte Film-Folien-Kombinationen

Die gewonnenen Untersuchungsergebnisse haben nur für die jeweilige Kombination aus Film und Folie Gültigkeit. Die verwendeten Folien können unter Umständen mit anderen Filmen erheblich unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die zur Verfügung stehenden Filme und Folien wurden zu folgenden Systemen kombiniert:

Siemens-Rubin	- Curix RP 1
Siemens-Spezial	- Curix RP 1
Siemens-Saphir	- Curix RP 1
CAWO-SE 1	- Curix RP 1

CAWO-SE 2	- Curix RP 1
CAWO-SE 4	- Curix RP 1
CAWO-SE 6	- Curix RP 1
Siemens-Titan U	- Curix RP 1
Siemens-Titan HS	- Curix RP 1
Siemens-Titanic	- Curix RP 1
Du Pont-Quanta II	- Curix RP 1
3M-Trimax $\propto$ 2	- 3M-Trimax XD
3M-Trimax $\propto$ 2	- 3M-Trimax XM
3M-Trimax $\propto$ 4	- 3M-Trimax XD
3M-Trimax $\propto$ 4	- 3M-Trimax XM
3M-Trimax $\propto$ 8	- 3M-Trimax XD
3M-Trimax $\propto$ 8	- 3M-Trimax XM
3M-Trimax $\propto$ 16	- 3M-Trimax XD
3M-Trimax $\propto$ 16	- 3M-Trimax XM
3M-Trimax $\propto$ 8	- Curix RP 1

Tab. 3 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Verstärkerfolien enthaltenen Leuchtstoffe.

In der Spalte $\lambda_{\max}$ ist für jede Folie diejenige Wellenlänge in Nanometer angegeben, bei der das von ihr ausgesandte Licht die größte Intensität besitzt.

Außerdem enthält die Tabelle für jede Folie diejenige Quantenenergie, für die die Folie am stärksten schwächend wirkt.

Folie	Leuchtstoff	$\lambda_{\max}$ [nm]	Röntgenstrahlungs-Schwäche max. bei einer Quanten- energie von x [keV]
Siemens-Rubin	CaWO_4	420	75
Siemens-Spezial	CaWO_4	420	75
Siemens-Saphir	CaWO_4	420	75
CAWO-SE 1	LaOBr:Tb	418,439	40
CAWO-SE 2	LaOBr:Tb	418,439	40
CAWO-SE 4	LaOBr:Tb	418,439	40
CAWO-SE 6	LaOBr:Tb	418,439	40
Siemens-Titan U	LaOBr:Tb	418,439	40
Siemens-Titan HS	LaOBr:Tb	418,439	40
Siemens-Titanic	LaOBr:Tb	418,439	40
DU PONT-Quanta II	BaFCl:Eu	385	40
3M-Trimax $\propto 2$	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	545	50
3M-Trimax $\propto 4$	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	545	50
3M-Trimax $\propto 8$	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	545	50
3M-Trimax $\propto 16$	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	545	50

Tab. 3 Daten der untersuchten Verstärkerfolien

3.1.2. Geräte:

3.1.2.1. Röntgeneinrichtung:

3.1.2.1.1. Röntgenstrahler:

Verwendet wurde ein Gerät der Fa. Siemens vom Typ BI 150/30 mit einer Gesamtfilterung von 2,5 mm Aluminium und einem Röhrenbrennfleck von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ bzw. $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$.

3.1.2.1.2. Röntgengenerator:

Die Röntgenröhre wurde von einem Generator der Fa. Siemens vom Typ Gigantos Optimatic 100 kW mit Energie versorgt.

3.1.2.1.3. Streustrahlenraster:

Je nach Film-Fokus-Abstand wurden zwei verschiedene Streustrahlenraster verwendet:

- Eine Katapult-Rasterlade mit Pb 12/40 , die auf einen FFA von 115 cm fokussiert war.
- Eine Katapult-Rasterlade mit Pb 12/40 , die auf einen FFA von 150 cm fokussiert war.

3.1.2.1.4. Kassetten:

Es wurden Siemens Aluminium-Standard-Kassetten mit Vorder- und Rückfolie für Thoraxaufnahmen verwendet.

3.1.2.1.5. Entwicklungsmaschine:

Alle Aufnahmen wurden sofort nach der Belichtung mit einem Automaten vom Typ Agfa-Gevaert Gevamat 401, Entwicklungszeit 90 s, entwickelt.

3.1.2.2. Beschreibung des Aufnahmeobjekts:

Als Aufnahmeobjekt stand ein Phantom der Deutschen Röntgen-Gesellschaft zur Verfügung. Es wurde vom "Ausschuß für Qualitätskriterien in der Röntgen-Diagnostik" der Deutschen Röntgen-Gesellschaft für Prüfzwecke im Rahmen der Qualitätssicherung in der Röntgen-Diagnostik entwickelt.

Beschreibung des Phantoms (32):

Es besteht aus einem massiven Plexiglaskörper mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm x 13 cm. Die Dicke ist so bemessen, daß möglichst praxisnahe Schwächungs- und Streuungsbedingungen für die Röntgenstrahlung erzielt werden. Das Plexiglas (Polymethylmethakrylat) führt zu einer gleichmäßigen Schwächung der Strahlung.

Im mittleren Bereich des Phantoms, der bei Verwendung einer Belichtungsautomatik die Meßkammer dieser Automatik bedeckt, ist eine homogene Aluminiumscheibe von 8 mm Dicke und 110 mm Durchmesser angebracht (Abb. 18). Die Aluminiumplatte ist in die filmferne Oberfläche des Phantoms eingelassen. Sie garantiert, daß die Schwärzung der Phantomaufnahmen durch die Belichtungsautomatik den richtigen Wert erhält.



Abb. 17
Das Phantom in
Aufnahmeposition

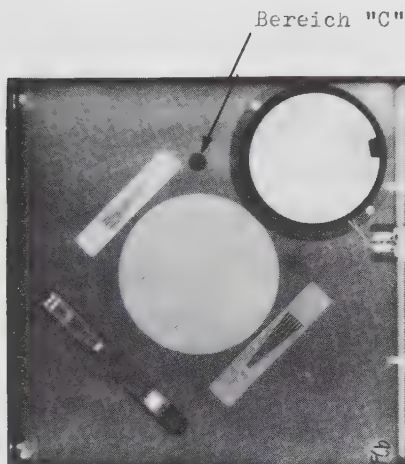


Abb. 18
Röntgenaufnahme
des Phantoms

Während der Aufnahme rotiert eine Bleischeibe mit einer Segmentaussparung im Strahlengang (rechts oben in Abb. 18). Sie wird von einem Synchronmotor angetrieben und hat eine Umlaufzeit von 400 ms . Aus der Bahnlänge der Segmentaussparung auf der Phantomaufnahme kann auf die Belichtungszeit geschlossen werden. Eine Schablone mit Winkelteilung erlaubt die Ablesung von Belichtungszeiten zwischen 15 und 400 ms. Es sollen damit in der Praxis übermäßig lange Belichtungszeiten erkannt werden.

Bei den Untersuchungen an den beschriebenen Film-Folien-Systemen war jedoch mit diesem Gerät häufig keine Zeitmessung möglich, da insbesondere die hochverstärkenden Folien zur Erzielung der geforderten Schwärzung Schaltzeiten weit unter 15 ms benötigten.

Die Messung der Eintrittsdosis, die während der Belichtung an der Oberfläche des Phantoms auftrat, erfolgte mit einem in die filmferne Seite des Phantoms eingelegten Stabdosi-meter (Fa. Friesseke und Höpfner Typ FH 39 S, Meßbereich 0 bis 1 R). Es wurde also die zur Eintrittsdosis äqui-valente Dosis am Phantom gemessen, d.h. die Strahlenenergie-menge, die unter klinischen Bedingungen an der Haut des Patienten wirksam wird.

Die ermittelten Dosiswerte blieben unkorrigiert bezüglich der Röhrenspannung, da der Korrekturfaktor zur Kalibrierung für die verwendeten Röhrenspannungen nur unwesentlich vom Wert 1,0 abweicht.

Im Prüfphantom ist in der fokusnahen und in der film-nahen Außenfläche je ein besenförmiger Auflösungstest eingebaut (Abb. 18). Die Besen bestehen aus sieben in eine 0,1 mm dicke Bleifolie geschnittenen Sektoren von 1 Grad Öffnungswinkel. Der filmnahe Auflösungstest gibt Hinweise auf die Eigenschaften des Bildaufzeichnungssystems wie z.B. auf die durch die Verstärkerfolie verursachte Unschärfe. Der fokusnahe Auflösungstest gibt Aufschluß darüber, ob bei der vorhandenen Abbildungsgeometrie in Verbindung mit dem gewählten Brennfleck zugelassene Auflösungsgrade gemessen werden können.

Durch die verschiedenen Materialstärken des Phantoms werden die Röntgenstrahlen unterschiedlich geschwächt und dadurch werden im Film verschiedene Schwärzungsgrade hervorgerufen. Im einzelnen zeigt das Phantom bezüglich der Röntgenstrahlenabsorption drei unterschiedliche Bereiche:

- 11 cm Plexiglas (2 cm tiefe Bohrung im Bereich C der Abb. 18)
- 13 cm Plexiglas (volle Phantomdicke)
- 12,2 cm Plexiglas und 0,8 cm Aluminium (Bildmitte in Abb. 18)

3.1.2.3. Densitometer

Es wurde ein Densitometer der Fa. Macbeth vom Typ Quanta Log mit einer Meßfläche von 3 mm Durchmesser in Filmebene benutzt.

Weiter stand ein Mikrodensitometer der Fa. Joyce und Loebel mit variablem Meßspalt und angeschlossenem x-y-Schreiber zur Verfügung.

3.1.2.4. Elektronischer Rechner

Die rechnerische Auswertung der Mikrodensitogramme erfolgte mit einem Elektronenrechner vom Typ Wang 2200.

Die Eingabe der Kurven in den Rechner wurde mit einem x-y-Koordinaten-Erfassungstisch der Fa. Summagraphics durchgeführt.

3.2. Untersuchungsanordnung zur Belichtung der Filme:

Es wurde ein Tisch-Gerät mit einem Film-Fokus-Abstand von 115 cm verwendet. Das Phantom lag bei der Belichtung der verschiedenen Film-Folien-Systeme waagrecht auf dem Aufnahmetisch, in dem sich das Streustrahlenraster und die Kassette mit Folien und Film befanden.

Am Tisch-Gerät wurden die Film-Folien-Systeme mit 57 kV, 70 kV und 81 kV Röhrenspannung belichtet.

Die Aufnahmen bei 90 kV, 102 kV und 117 kV wurden an einem Wandstativ mit einem Film-Fokus-Abstand von 150 cm angefertigt. Das Phantom befand sich dabei in senkrechter Aufnahmeposition direkt vor dem Streustrahlenraster und der Aufnahmekassette.

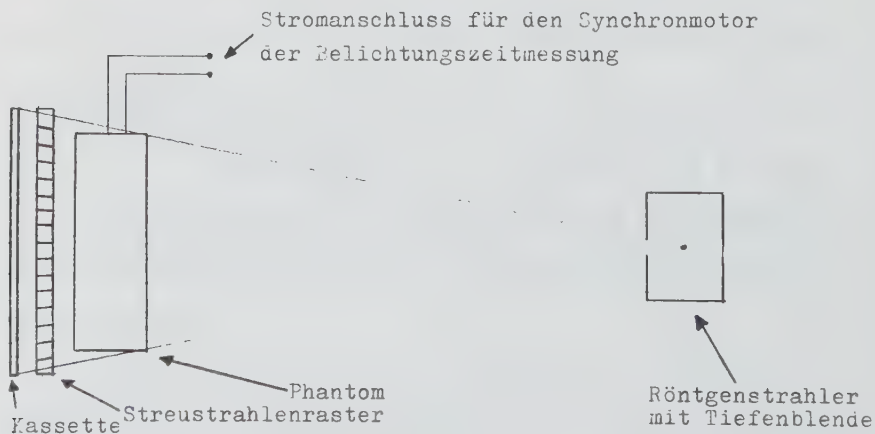


Abb. 19 Schematische Darstellung der Untersuchungsanordnung zur Belichtung der Filme

3.3. Untersuchungsdurchführung

Die unter 3.1.1.3. beschriebenen Film-Folien-Kombinationen wurden in die Aluminiumkassetten eingelegt. Es wurden wie im täglichen Routinebetrieb Vorder- und Rückfolie nach den Angaben der Hersteller verwendet.

Mit allen Kombinationen wurde zunächst am Tisch-Gerät bei Röhrenspannungen von 57 kV, 70 kV und 81 kV das Testphantom abgebildet. Der FFA betrug dabei 115 cm und die Größe des Röhrenbrennflecks $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$.

Bei einer Röhrenspannung von 57 kV wurden zusätzlich Aufnahmen mit einer Brennfleckgröße von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ angefertigt.

Anschließend wurden alle Film-Folien-Kombinationen an einem Wandstativ mit einem FFA von 150 cm bei Röhrenspannungen von 90 kV, 102 kV und 117 kV und einer Brennfleckgröße von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ belichtet. Das Testphantom wurde wieder als Aufnahmeobjekt verwendet.

Für jede der Aufnahmen wurden folgende Daten festgehalten:

- Die am Schaltpult angezeigte Röhrenspannung
- Die am Schaltpult angezeigte Elektrizitätsmenge (mAs-Produkt), die für die Belichtung der Aufnahme nötig war.
- Die mit Hilfe des im Phantom eingebauten Stabdosimeters gemessene Eintrittsdosis an der Phantomboberfläche
- Das Flächendosisprodukt

Zusätzlich zur Anzeige der Elektrizitätsmenge in mAs am Schaltpult wurde bei einigen Aufnahmen dieser Wert mit

einem ballistischen mAs-Meter der Fa. Siemens am Meßpunkt des Röntgengenerators für mAs gemessen.

Die belichteten Filme wurden jeweils sofort nach der Aufnahme in einem Entwicklungsautomaten vom Typ Agfa-Gevaert Gevamat 401 neunzig Sekunden lang entwickelt und anschließend mit dem Densitometer Macbeth Quanta Log auf ihre mittlere Schwärzung im Bereich "C" (Abb. 18) untersucht. In den Fällen, wo die Schwärzung im Bereich "C" nicht dem Wert $S = 1$ mit einer Toleranz von $\pm 10\%$ entsprach, wurde die Aufnahme mit veränderter mAs-Einstellung wiederholt.

In jedem der gewonnenen Bilder wurde der filmnahe Auflösungs-test ausgewertet, der Rückschlüsse auf das verwendete Abbildungssystem zuläßt. Diese Auswertung erfolgte mit dem menschlichen Auge ohne Hilfsmittel und für alle Aufnahmen an der gleichen Stelle ein und desselben Leuchtkastens. Da das abgebildete Objekt unverändert blieb und die Auswertung mit dem menschlichen Auge erfolgte, handelt es sich dabei um ein halbobjektives Verfahren der Bildbeurteilung.

Um für die einzelnen Film-Folien-Kombinationen Schwärzungskurven zur Untersuchung des Kontrastverhaltens konstruieren zu können, war es notwendig, auf einem Film eine möglichst große Anzahl verschiedener Schwärzungswerte zu erhalten. Wir verwendeten dazu einen Keil aus homogenem Aluminium als Abbildungsobjekt. Der Keil hatte eine Materialstärke von 3 bis 39 mm ansteigend in Stufen von 3 mm Höhe. Er wurde ohne Verwendung eines Streustrahlenrasters direkt

auf die Kassette gelegt, in der sich die zu untersuchende Film-Folien-Kombination befand. Die Belichtung erfolgte mit Röhrenspannungen von 57 kV, 81 kV und 90 kV.

Der FFA betrug 115 cm und die Größe des Brennflecks $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$.

Mit dem Macbeth Quanta Log Densitometer wurden nach der Filmentwicklung die den einzelnen Filterstärken (mm Al) zuzuordnenden Schwärzungswerte gemessen.

3.4. Meßwerte

Im Folgenden werden für die einzelnen Film-Folien-Kombinationen Kennbuchstaben und graphische Symbole gemäß untenstehender Zuordnung verwendet:

A	Siemens-Rubin	- Curix RP 1.	—————
B	Siemens-Spezial	- Curix RP 1	—— ——— ———
C	Siemens-Saphir	- Curix RP 1	— · — · — · — · — · — · —
D	CAWO-SE 1	- Curix RP 1	- - - - -
E	CAWO-SE 2	- Curix RP 1	
F	CAWO-SE 4	- Curix RP 1	—▲—▲—▲—▲—
G	CAWO-SE 6	- Curix RP 1	—▲—▲—▲—▲—
H	Siemens-Titan U	- Curix RP 1	—○—○—○—○—
I	Siemens-Titan HS	- Curix RP 1	—●—●—●—●—
K	Siemens-Titanic	- Curix RP 1	—·—·—·—·—·—·—
L	Du Pont-Quanta II	- Curix RP 1	—x—x—x—x—
M	3M-Trimax α 2	- 3M Trimax XD	—●—●—●—●—
N	3M-Trimax α 2	- 3M Trimax XM	— — — — — —
O	3M-Trimax α 4	- 3M Trimax XD	—+—+—+—+—
P	3M-Trimax α 4	- 3M Trimax XM	—□—□—□—□—
Q	3M-Trimax α 8	- 3M Trimax XD	—■—■—■—■—
R	3M-Trimax α 8	- 3M Trimax XM	—~—~—~—~—
S	3M-Trimax α 16	- 3M Trimax XD	—+—+—+—+—
T	3M-Trimax α 16	- 3M Trimax XM	—v—v—v—v—
U	3M-Trimax α 8	- Curix RP 1	—u—u—u—u—

3.4.1. mAs-Produkt:

Tabelle 4 enthält die beim Aufbelichten des Phantoms auf die einzelnen Film-Folien-Kombinationen gemessenen Werte der Elektrizitätsmenge, die während der Aufnahme die Röntgenröhre durchflossen hat. Es sind nur die Aufnahmen berücksichtigt, die mit einer Brennfleckgröße von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ angefertigt wurden.

Die Meßwerte sind in Milliampere x Sekunden angegeben und nach der verwendeten Aufnahmespannung geordnet.

In Tabelle 5 sind die mAs-Werte enthalten, die sich bei der Verwendung einer Brennfleckgröße von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ und einer Röhrenspannung von 57 kV ergaben. Zum Vergleich sind die mAs-Werte für die Brennfleckgröße $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ bei der gleichen Aufnahmespannung angegeben.

Theoretisch wäre zu erwarten, daß die mAs-Werte bei einem um 75 % verkleinerten Brennfleck wesentlich ansteigen. Wie die Meßwerte zeigen, bleibt die fließende Energiemenge aber trotz der Brennfleckverkleinerung nahezu unverändert. Auch die Filmschwärzung war in beiden Fällen gleich.

Möglich wird dies dadurch, daß die eingebaute Belichtungsautomatik bei kleinem Brennfleck den geringeren Röhrenstrom durch eine längere Schaltzeit ausgleicht, sodaß die insgesamt fließende Energiemenge gleich bleibt.

Film- Folien- Kombination \ Röhren- spannung kV	57	70	81	90	102	117
A	115,0	50,0	28,0	60,0	35,0	22,5
B	21,0	12,0	8,0	14,0	8,5	5,5
C	60,0	25,0	16,0	20,0	15,0	11,0
D	65,0	31,0	19,0	24,0	17,5	13,0
E	22,0	12,0	8,5	9,5	7,0	5,0
F	12,5	7,0	5,0	6,5	4,0	3,5
G	11,0	6,5	4,5	5,0	4,0	3,5
H	26,0	16,5	11,5	11,0	11,0	9,0
I	14,0	9,5	6,5	5,0	5,0	4,0
K	11,5	7,5	5,0	5,0	5,0	3,5
L	12,0	8,0	6,0	8,0	5,0	3,8
M	33,0	23,0	11,5	11,0	11,0	6,0
O	50,0	20,0	11,0	16,0	12,0	7,5
P	23,0	9,5	6,5	9,0	6,0	4,2
Q	29,0	11,5	8,5	11,0	7,0	4,5
R	15,0	7,0	7,0	6,0	4,0	3,5

Tabelle 4 Gemessene Elektrizitätsmenge pro
Aufnahme in mA x s für eine Brennfleck-
abmessung von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$

Film- Folien- Kombination	großer Brennfleck	kleiner Brennfleck
A	115,0	125,0
B	21,0	21,0
C	60,0	60,0
D	65,0	64,0
E	22,0	21,0
F	12,5	14,0
G	11,0	9,5
H	26,0	32,0
I	14,0	13,0
K	11,5	10,5
L	12,0	13,5
O	50,0	50,0
P	25,0	20,0
Q	29,0	32,0
R	15,0	10,0

Tabelle 5 Vergleich der gemessenen mAs-Werte bei einer Röhrenspannung von 57 kV mit einer Brennfleckgröße von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ (großer Brennfleck) und einer Brennfleckgröße von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ (kleiner Brennfleck)

Die Abb. 20 zeigt in einer graphischen Darstellung einen Vergleich der am Schalterpult eingestellten $\text{mA}\cdot\text{s}$ -Werte mit den am ballistischen Meßinstrument abgelesenen Werten. In der Abszisse ist jeweils der am Kontrollpult eingestellte Wert aufgetragen, in der Ordinate der am Generator gemessene Wert.

Der mit dem ballistischen Instrument bestimmte $\text{mA}\cdot\text{s}$ -Wert lag um durchschnittlich 10 % über dem am Schalterpult angezeigten Wert. Es fließt also in Wirklichkeit mehr Elektrizität durch die Röntgenröhre als am Kontrollpult angezeigt wird.

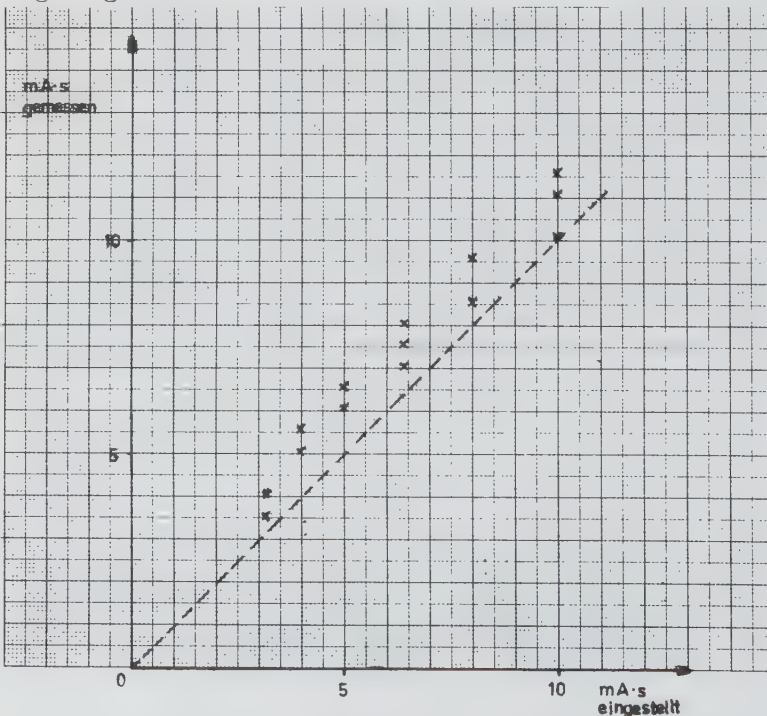


Abb. 20 Graphischer Vergleich der am Schalterpult eingestellten und der mit dem ballistischen Instrument am Generator gemessenen $\text{mA}\cdot\text{s}$ -Werte

3.4.2. Dosis

Mit dem in die fokusnahe Oberfläche des Phantoms eingelegten Stabdosisimeter der Fa. Friesseke und Höpfner vom Typ FH 39 S wurde während jeder Aufnahme die Ionendosis gemessen. Tabelle 6 enthält die Meßwerte dieser Eintrittsdosen in Milliröntgen für die Aufnahmen mit einer Brennfleckgröße von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$.

Film- Folien- Kombination \ Röhren- spannung [kV]	57	70	81	90	102	117
A	790	500	420	320	220	200
B	180	120	100	100	90	80
C	400	290	220	100	120	100
D	500	320	400	130	110	100
E	150	120	120	60	70	60
F	100	90	80	50	30	40
G	100	90	80	50	30	50
H	100	190	110	80	80	80
I	100	100	90	30	40	50
K	130	90	90	50	50	30
L	100	100	100	50	40	70
N	230	190	130	80	90	50
O	400	220	180	100	90	100
P	190	110	100	70	60	40
Q	200	120	100	80	50	50
R	120	90	100	50	20	20

Tabelle 6 Gemessene Eintrittsdosen in Milliröntgen

Bei einer Aufnahmespannung von 57 kV mit veränderter Brennfleckabmessung von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ ergaben sich für alle Kombinationen die gleichen Meßwerte für die Eintrittsdosis wie mit einer Brennfleckgröße von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$.

Nachdem die Änderung der Brennfleckgröße keinen Einfluß auf das mAs-Produkt hatte (Abschn. 3.4.1.), war dies auch für die Eintrittsdosis zu erwarten.

Mit einer Verminderung der Brennfleckgröße sinkt nur die Dosisleistung. Dosis und Dosisleistung unterscheiden sich durch den Faktor Zeit, wobei die folgende Beziehung gilt:

$$\text{Dosisleistung} = \frac{\text{Dosis}}{\text{Zeit}}$$

Der Faktor "Zeit" ist als Schaltzeit der Röntgenröhre zu verstehen. Aus der angegebenen Beziehung läßt sich ableiten, daß mit fallender Dosisleistung die Belichtungszeit ansteigen muß, damit sich der Wert der Dosis nicht verändert.

3.4.3. Flächendosisprodukt

Unter dem Flächendosisprodukt versteht man das Produkt aus der Einfalldosis und der Querschnittsfläche des Nutzstrahlenbündels beim Eintritt der Strahlung in das zu untersuchende Objekt. Die Einfalldosis ist gleich der um den Streustrahlenanteil verminderten Eintrittsdosis.

Das Flächendosisprodukt wird mit flachen Ionisationskammern gemessen, deren Durchmesser größer als der des Nutzstrahlenbündels sein muß. Da das Flächendosisprodukt vom Fokus-

Objekt-Abstand unabhängig ist, bringt man die Ionisationskammer direkt im Anschluß an die Tiefenblende in das Nutzstrahlenbündel.

Die Angabe des Flächendosisprodukts erfolgt in Röntgen x Quadratzentimeter ($R \times cm^2$). Tab. 7 enthält die Meßwerte, die bei der Belichtung der einzelnen Film-Folien-Kombinationen gewonnen wurden (Brennfleckgröße $1,2 \times 1,2 mm^2$).

Film-Folien-Kombination \ Röhrenspannung [kV]	57	70	81	90	102	117
A	74	44	35	24	16	15
B	13	10	8	5	4	2
C	38	23	19	7	9	6
D	41	30	23	9	8	6
E	14	9	8	3	4	2
F	8	7	4	2	2	2
G	8	4	3	1	1	2
H	13	9	6	5	4	2
I	6	5	4	1	2	2
K	8	6	5	1	1	1
L	9	8	5	2	1	2
N	16	12	9	5	5	3
O	32	17	11	5	5	4
P	9	7	6	3	2	2
Q	16	9	8	3	2	2
R	9	5	5	1	1	1

Tabelle 7 Meßwerte des Flächendosisprodukts in $R \times cm^2$
(Brennfleckgröße : $1,2 \times 1,2 mm^2$)

Ein Einfluß der Brennfleckgröße auf das Flächendosisprodukt war an Hand der bei 57 kV Röhrenspannung mit einer Brennfleckabmessung von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ wiederholten Aufnahmen erwartungsgemäß nicht festzustellen.

3.4.4. Auflösungsvermögen

Nach der maschinellen Entwicklung der Filme erfolgte die Auswertung des im Phantom eingebauten filmnahen Auflösungs-tests. Da es sich bei dem im Phantom verwendeten Test um ein Besenraster handelt, war eine Umrechnung der ermittelten Werte in LP/mm notwendig. Dies bedingt die ungeraden Zahlenwerte in der folgenden Tab. 8. Sie gibt das Auflösungsvermögen der einzelnen Film-Folien-Systeme in LP/mm für unterschiedliche Röhrenspannungen an. Die Brennfleckgröße betrug für die in Tab. 8 angegebenen Werte $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$. Da die Auflösung vom FFA abhängig ist, muß beachtet werden, daß die Aufnahmen mit 57 kV, 70 kV und 81 kV bei einem FFA von 115 cm und die Aufnahmen mit 90 kV, 102 kV und 117 kV bei einem FFA von 150 cm durchgeführt wurden.

Tab. 9 zeigt einen Vergleich der Auflösungswerte bei veränderter Brennfleckgröße. Erwartungsgemäß führte eine Verkleinerung der Brennfleckabmessungen bei allen untersuchten Film-Folien-Systemen zu einer Verbesserung des Auflösungsvermögens. Dies ist auf die abnehmende geometrische Unschärfe zurückzuführen. (Abb. 2)

Film- Folien- Kombination \ Röhren- spannung [kV]	57	70	81	90	102	117
A	3,82	3,82	3,82	5,00	5,00	5,00
B	3,24	2,82	3,82	5,00	4,50	4,28
C	3,41	3,24	3,41	5,00	5,00	5,00
D	3,82	3,41	3,82	5,00	5,00	5,00
E	3,09	3,09	3,09	4,28	4,28	3,74
F	2,82	2,82	3,09	4,28	3,74	4,28
G	2,82	2,09	2,82	2,13	2,72	3,32
H	2,82	2,59	3,09	3,32	5,00	5,00
I	2,59	2,40	2,82	2,99	2,99	3,32
K	2,82	2,40	3,09	4,27	3,99	3,74
L	3,09	2,82	3,09	4,28	3,74	4,27
N	2,82	2,82	2,82	5,00	4,28	5,00
O	3,41	3,41	3,41	5,00	5,00	5,00
P	3,41	3,41	3,41	5,00	4,28	5,00
Q	3,41	3,09	3,41	3,74	3,99	3,74
R	3,09	2,59	3,09	3,74	3,74	3,74

Tabelle 8 Auflösungswerte der untersuchten Film-Folien-Kombinationen in LP/mm (Brennfleckgröße 1,2x1,2mm², FFA 115 cm bei 57 kV, 70 kV und 81 kV, FFA 150 cm bei 90 kV, 102 kV und 117 kV)

Film- Folien- Kombination	großer Brennfleck	kleiner Brennfleck
A	3,82	5,00
B	3,24	4,33
C	3,41	4,33
D	3,82	4,33
E	3,09	4,33
F	2,82	3,60
G	2,82	2,82
H	2,82	3,82
I	2,59	3,09
K	2,82	3,41
L	3,09	3,82
N	2,82	3,41
O	3,41	4,33
P	3,41	4,33
Q	3,41	3,82
R	3,09	4,33

Tabelle 9 Vergleich der Auflösungswerte der einzelnen Film-Folien-Kombinationen in LP/mm bei 57 kV Röhrenspannung, FFA 115 cm und unterschiedlicher Brennfleckgröße (großer Brennfleck: $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$, kleiner Brennfleck: $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$)

3.5. Ergebnisse

Die bei der Belichtung der Film-Folien-Systeme gewonnenen Meßwerte von mAs-Produkt, Dosis, Flächendosisprodukt und Auflösungsvermögen erlauben einen Vergleich der einzelnen Systeme.

Zunächst werden in diesem Abschnitt diejenigen Ergebnisse beschrieben, die sich aus den Meßwerten ableiten lassen, die bei der Belichtung der Aufnahmen und bei der halbobjektiven Auswertung des Auflösungstests gewonnen wurden.

Anschließend wird mittels eines objektiven Verfahrens das Rauschen der verschiedenen Film-Folien-Systeme verglichen.

3.5.1. Aus den Meßwerten abgeleitete Ergebnisse:

3.5.1.1. Abhängigkeit des mAs-Produkts von der verwendeten Film-Folien-Kombination und von der Röhrenspannung

Beim Vergleich des am Schaltpult angezeigten mAs-Wertes mit einer direkt am Generator durchgeführten Messung ergab sich, daß das Schaltpult gegenüber dem am Generator angeschlossenen ballistischen Meßinstrument im Durchschnitt um 10 % niedrigere Werte anzeigte. (Abb. 20)

Die Elektrizitätsmenge, die zur Erzielung der geforderten Schwärzung $S = 1$ die Röntgenröhre durchfließen mußte, war für die verschiedenen Film-Folien-Systeme sehr unterschiedlich. Das gemessene mAs-Produkt lag im Bereich zwischen

3,5 und 115 mas .

Für alle Kombinationen gilt, daß mit steigender Aufnahme-
spannung das erforderliche mas-Produkt abnimmt.

Dieses auch von Freyschmidt und Mitarb. (19) beschriebene
Phänomen wird als Spannungsgang bezeichnet. Es ist dadurch
zu erklären, daß das einzelne Röntgenquant bei höherer
Spannung eine größere Energie besitzt und daß somit insgesamt
weniger Quanten das Aufnahmesystem treffen müssen, um die
zur Schwärzung notwendige Gesamtenergie zu übertragen.

Erwartungsgemäß zeigt die Abb. 21, daß zur Schwärzung der
feinzeichnenden Film-Folien-Kombinationen höhere mas-Werte
erforderlich waren als zur Schwärzung der Universal- und
hochverstärkenden Systeme. Abb. 21 gibt die während der
Aufnahme durch die Röntgenröhre geflossene Elektrizitäts-
menge in mas in Abhängigkeit von der verwendeten Röhren-
spannung in kV an.

Da die Aufnahmen bei 57 kV, 70 kV und 81 kV mit einem
FFA von 115 cm angefertigt wurden, während der FFA für die
Aufnahmen mit 90 kV, 102 kV und 117 kV 150 cm betrug, ist
die Abb. 21 und alle weiteren in zwei Diagramme geteilt, die
sich durch den verwendeten FFA unterscheiden. Da für die
Röntgenstrahlung das quadratische Abstandsgesetz gilt, welches
besagt, daß bei Verdopplung des FFA die Dosisleistung auf
ein Viertel des ursprünglichen Wertes abfällt (1),
ist das mas-Produkt bei einer Aufnahmespannung von 90 kV und
einem FFA von 150 cm größer als bei einer Röhrenspannung von
81 kV und einem FFA von 115 cm.

Die Abnahme des mAs-Bedarfs von niedrigen zu hohen Röhrenspannungen hin war für Kombinationen mit hohem Dosisbedarf stärker ausgeprägt als für diejenigen mit geringem Dosisbedarf. Die kleinsten mAs-Werte wurden im Durchschnitt mit der Kombination G erreicht, einem hochverstärkenden System auf SE-Folien-Basis. Die höchsten Werte wurden für die feinzeichnende CaWO_4 -Komb. A gemessen.

Vergleicht man die Werte der feinzeichnenden Komb. A (CaWO_4) mit denen der feinzeichnenden SE-Kombinationen D und O, welche annähernd die gleiche Auflösung erreichen, so sind die mAs-Werte für D um durchschnittlich 40 % und für O um durchschnittlich 60 % niedriger als die Werte für Kombination A.

Die mAs-Werte der hochverstärkenden CaWO_4 -Komb. B lagen 80 % unter denen der feinzeichnenden CaWO_4 -Komb. A, die Werte der höchstverstärkenden SE-Kombinationen lagen um 90 % unter denen der Komb. A. Es erscheint jedoch nicht sinnvoll, feinzeichnende Kombinationen mit höchstverstärkenden zu vergleichen.

Tab. 10 gibt einen Überblick über die relativen Belichtungs-
werte (mAs) der einzelnen Kombinationen bezogen auf die CaWO_4 -Komb. C. Für jede Röhrenspannung wurde dazu das prozentuale Verhältnis der mAs-Werte der einzelnen Komb. zum mAs-Wert der Komb. C bei dieser Spannung ermittelt. Tab. 10 enthält diese Verhältnisangaben in Prozent, wobei die Zahlenwerte den Mittelwert der bei den untersuchten sechs Aufnahmespannungen gewonnenen Verhältnisse darstellen.

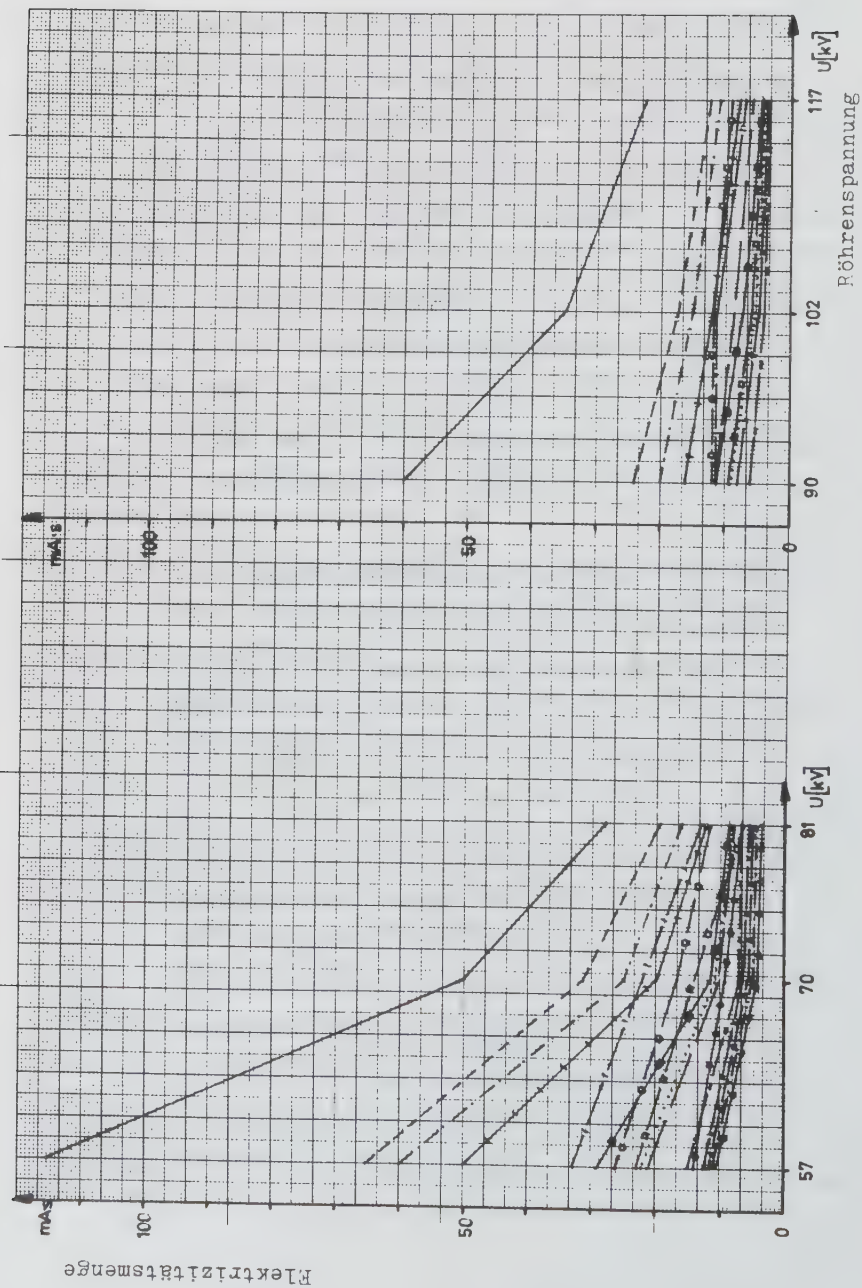


Abb. 21 Abhängigkeit der Elektrizitätsmenge in mAs von der Röhrenspannung in kV (Brennfleckgröße $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$)

Film- Folien- Kombination	Relative mAs-Werte bezogen auf Komb. C
A	218 %
B	52 %
C	100 %
D	118 %
E	47 %
F	29 %
G	26 %
H	65 %
I	33 %
K	28 %
L	33 %
N	67 %
O	77 %
P	40 %
Q	48 %
R	31 %

Tabelle 10 Die relative Belichtung der einzelnen Kombinationen bezogen auf die CaWO_4 -Komb. C in Prozent

Die Brennfleckgröße der Röntgenröhre hatte keinen Einfluß auf die mAs-Werte, da die Belichtungsautomatik der Röntgeneinrichtung den bei kleiner Brennfleckabmessung geringeren Röhrenstrom durch eine Verlängerung der Schaltzeit ausglich. Dadurch blieb das mAs-Produkt trotz Verkleinerung des Brennflecks auf ein Viertel der ursprünglichen Größe unverändert.

In den Fällen, wo eine Messung der Belichtungszeit mit Hilfe des im Phantom eingebauten Synchronmotors möglich war (bei Schaltzeiten deutlich über 15 ms), ergaben sich bei kleinem Brennfleck erwartungsgemäß höhere Schaltzeiten als bei großem Brennfleck. Für die Komb. A betrug beispielsweise die Schaltzeit bei einer Röhrenspannung von 57 kV und einer Brennfleckgröße von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ 240 ms, während sie bei unveränderter Röhrenspannung und einer verkleinerten Brennfleckabmessung von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ auf 350 ms anstieg.

3.5.1.2. Abhängigkeit der gemessenen Oberflächendosis von der verwendeten Film-Folien-Kombination und von der Röhrenspannung

Die mit dem im Phantom eingebauten Stabdosisimeter gemessene Ionendosis lag im Bereich von 20 bis 790 mR pro Aufnahme. Die Abb. 22 und 23 zeigen die Abhängigkeit der Eintrittsdosis von der Röhrenspannung. In der Abb. 22 wurden die Komb. mit relativ geringem Dosisbedarf im schraffierten Bereich zusammengefaßt, um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten.

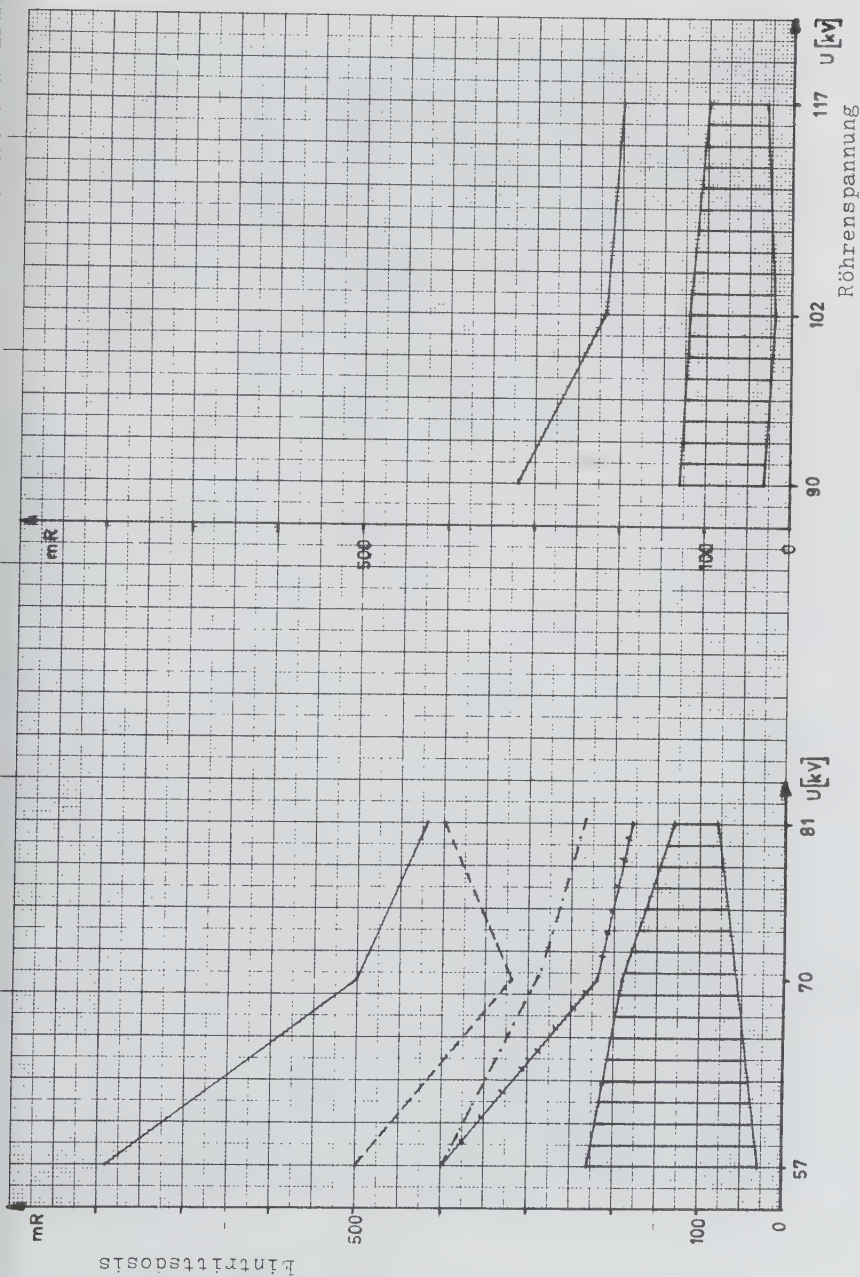


Abb. 22 Abhängigkeit der am Phantom gemessenen Eintrittsdosis in mR von der Aufnahmespannung in kV (Brennfleckgröße: 1,2 x 1,2 mm²)

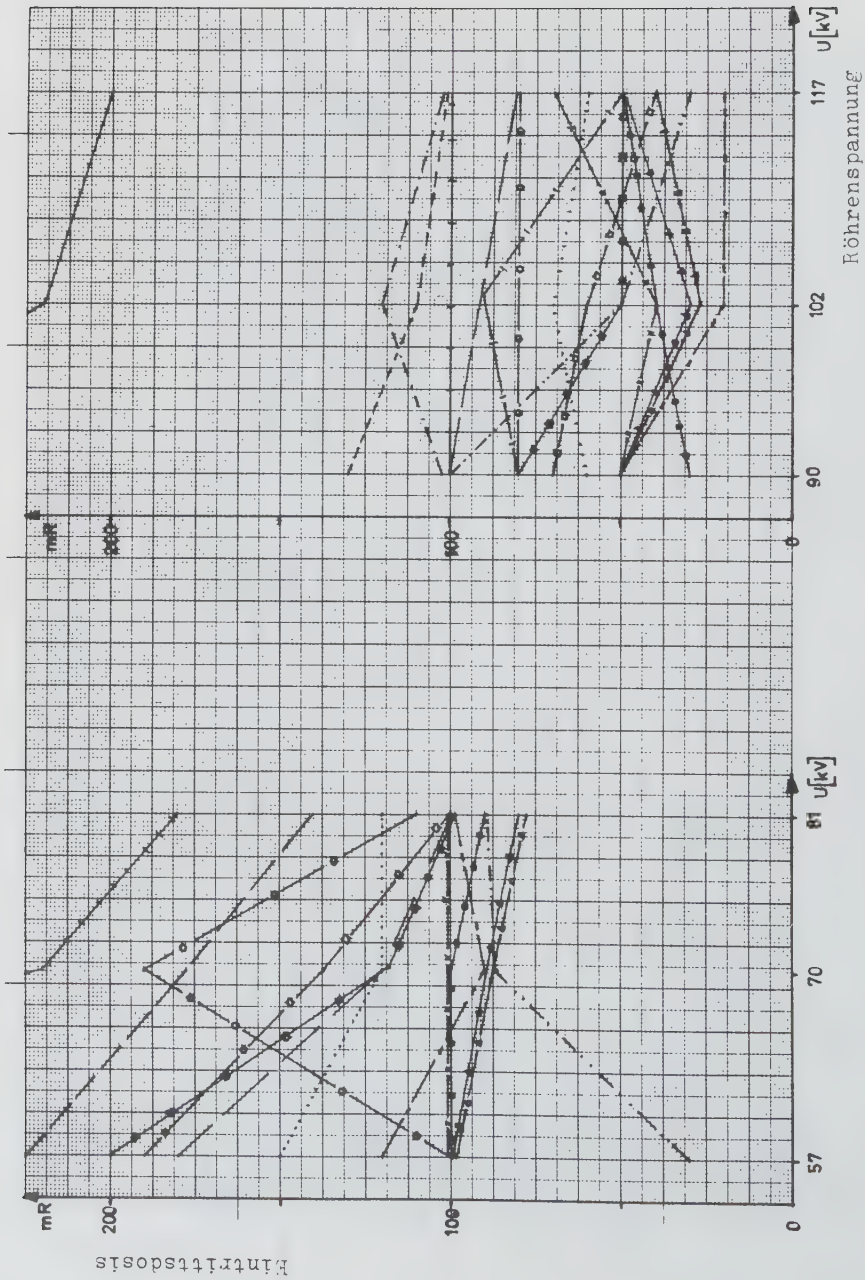


Abb. 23 Abhängigkeit der am Phantom gemessenen Eintrittsdosis
in mR von der Aufnahmespannung in kV
(Brennfleckgröße: $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$)

Die meisten Film-Folien-Kombinationen zeigten bei ansteigender Röhrenspannung einen abnehmenden Dosisbedarf. Das bedeutet, daß bei gleichbleibender Filmschwärzung die Strahlenbelastung für den Patienten bei höheren Aufnahme-spannungen geringer wird. Dies gilt vor allem für Kombinationen mit relativ hohem Dosisbedarf wie z.B. die feinzeichnende Kombination A.

Vergleicht man die Dosiswerte bei einer Röhrenspannung von 90 kV, so ergibt sich für die feinzeichnende CaWO_4 -Komb. A ein um den Faktor 2,5 höherer Dosisbedarf gegenüber der feinzeichnenden SE-Kombination D bei vergleichbarem Auflösungsvermögen. Die höchstverstärkenden SE-Kombinationen weisen bei dieser Röhrenspannung Eintrittsdosen auf, die nur ein Zehntel des Dosisbedarfs der feinzeichnenden Komb. A betragen. Allerdings besitzen diese empfindlichen Systeme ein wesentlich geringeres Auflösungsvermögen als das feinzeichnende System mit hohem Dosisbedarf.

Daß feinzeichnende Systeme einen höheren Dosisbedarf aufweisen, ist auch am 3M-Trimax-System zu erkennen:

Der Film Trimax XD läßt laut Angaben des Herstellers eine höhere Bildqualität zu als der Film Trimax XM. Bei den Messungen zeigte sich, daß der Dosisbedarf des Films Trimax XD bis zu 100 % höher war als der des Films Trimax XM bei Verwendung ein und derselben Verstärkerfolie des Trimax-Systems.

Ein Einfluß des Fokus-Film-Abstandes auf die gemessene Eintrittsdosis war bei den durchgeführten Messungen wie zu erwarten war nicht erkennbar.

Auch die Verkleinerung der Brennfleckabmessung bei einer Aufnahmespannung von 57 kV auf ein Viertel der ursprünglichen Größe zeigte erwartungsgemäß keine Auswirkung auf die gemessene Dosis.

Während das gemessene mAs-Produkt für alle Film-Folien-Kombinationen mit zunehmender Röhrenspannung stetig abnahm, ist dies für die gemessene Dosis bei einigen Kombinationen wider Erwarten nicht der Fall. Da weder das mAs-Produkt, noch das zusätzlich gemessene Flächendosisprodukt derartige Unstetigkeiten aufwiesen, wie sie für die Dosismessung in Abb. 23 zu erkennen sind, kommen als Erklärung nur Fehler bei der Dosismessung in Betracht. Hierfür spricht auch, daß die Unstetigkeiten bei nahezu allen untersuchten Film-Folien-Kombinationen auftraten.

3.5.1.3. Abhängigkeit des Flächendosisprodukts von der verwendeten Film-Folien-Kombination und von der Röhrenspannung

Die Meßwerte für das Flächendosisprodukt lagen zwischen $1 \text{ R} \times \text{cm}^2$ und $74 \text{ R} \times \text{cm}^2$. Die Abb. 24 und 25 zeigen die Abhängigkeit des Flächendosisprodukts von der Röhrenspannung für die einzelnen Film-Folien-Kombinationen. In Abb. 24 ist aus Gründen der Übersichtlichkeit wieder eine Zusammenfassung der Systeme mit geringem Flächendosisprodukt zu einem schraffierten Bereich vorgenommen worden.

Für alle untersuchten Systeme gilt, daß das Flächendosis-

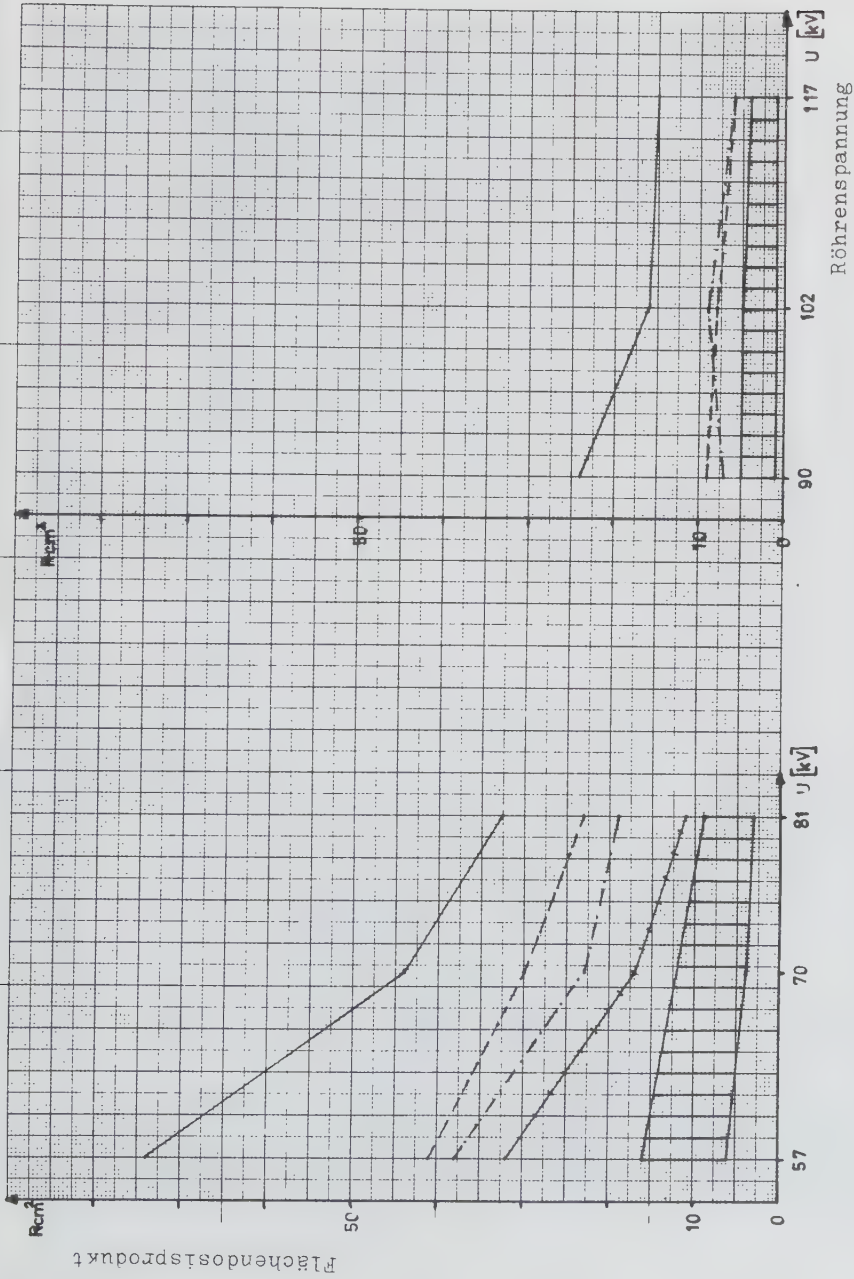


Abb. 24 Abhängigkeit des Flächendosisprodukts in $R \times \text{cm}^2$
von der Aufnahmespannung in kV (Brennfleckgröße:
 $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$)

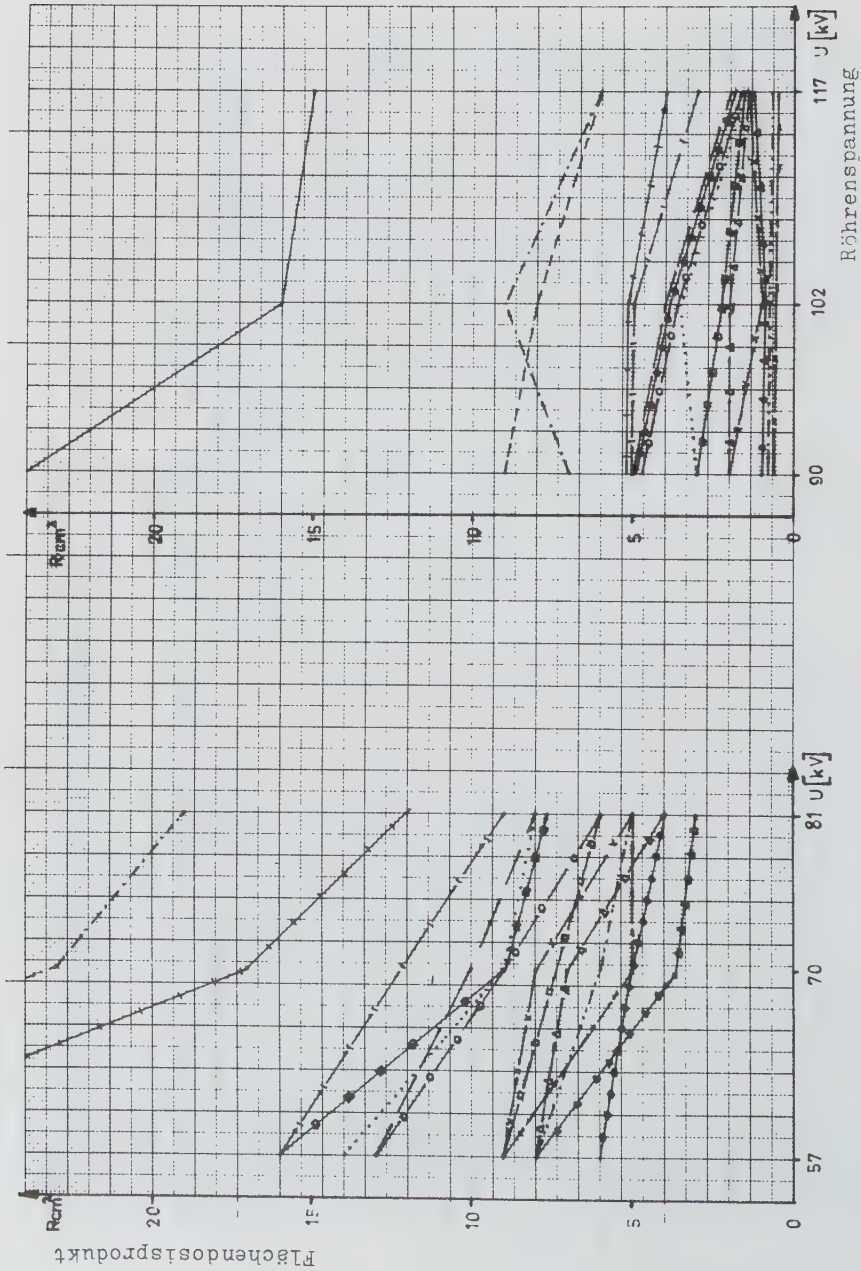


Abb. 25 Abhängigkeit des Flächendosisprodukts in $R \times cm^2$
von der Aufnahmespannung in kV (Brennfleckgröße:
 $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$)

produkt mit ansteigender Aufnahmespannung abnimmt und zwar umso ausgeprägter, je höher der Dosisbedarf des jeweiligen Systems ist. Feinzeichnende Kombinationen wiesen ein höheres Flächendosisprodukt auf als hochverstärkende. Bei einer Röhrenspannung von 90 kV war das gemessene Flächendosisprodukt der feinzeichnenden CaWO_4 -Komb. A fünfmal so groß wie das der hochverstärkenden CaWO_4 -Komb. B. Die feinzeichnende SE-Komb. D wies bei 90 kV einen um 60 % niedrigeren Wert für das Flächendosisprodukt auf als die feinzeichnende CaWO_4 -Komb. A. Die höchstverstärkenden SE-Kombinationen unterscheiden sich von der feinzeichnenden CaWO_4 -Komb. A bei einer Röhrenspannung von 90 kV um den Faktor 24. Da das Flächendosisprodukt vom FFA unabhängig ist, hatte die Vergrößerung dieses Abstandes von 115 auf 150 cm keinen Einfluß auf die Meßwerte. Ebenso war die Verkleinerung des Brennflecks bei einer Röhrenspannung von 57 kV erwartungsgemäß ohne Auswirkung auf die Meßwerte des Flächendosisprodukts.

3.5.1.4. Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von der verwendeten Film-Folien-Kombination und von der Röhrenspannung

Das Auflösungsvermögen der einzelnen Film-Folien-Kombinationen wurde durch Auswertung des filmnahen Besentests auf den entwickelten Filmen bestimmt. Mit dem verwendeten Test waren nach Umrechnung Auflösungswerte von 5 LP/mm erreichbar.

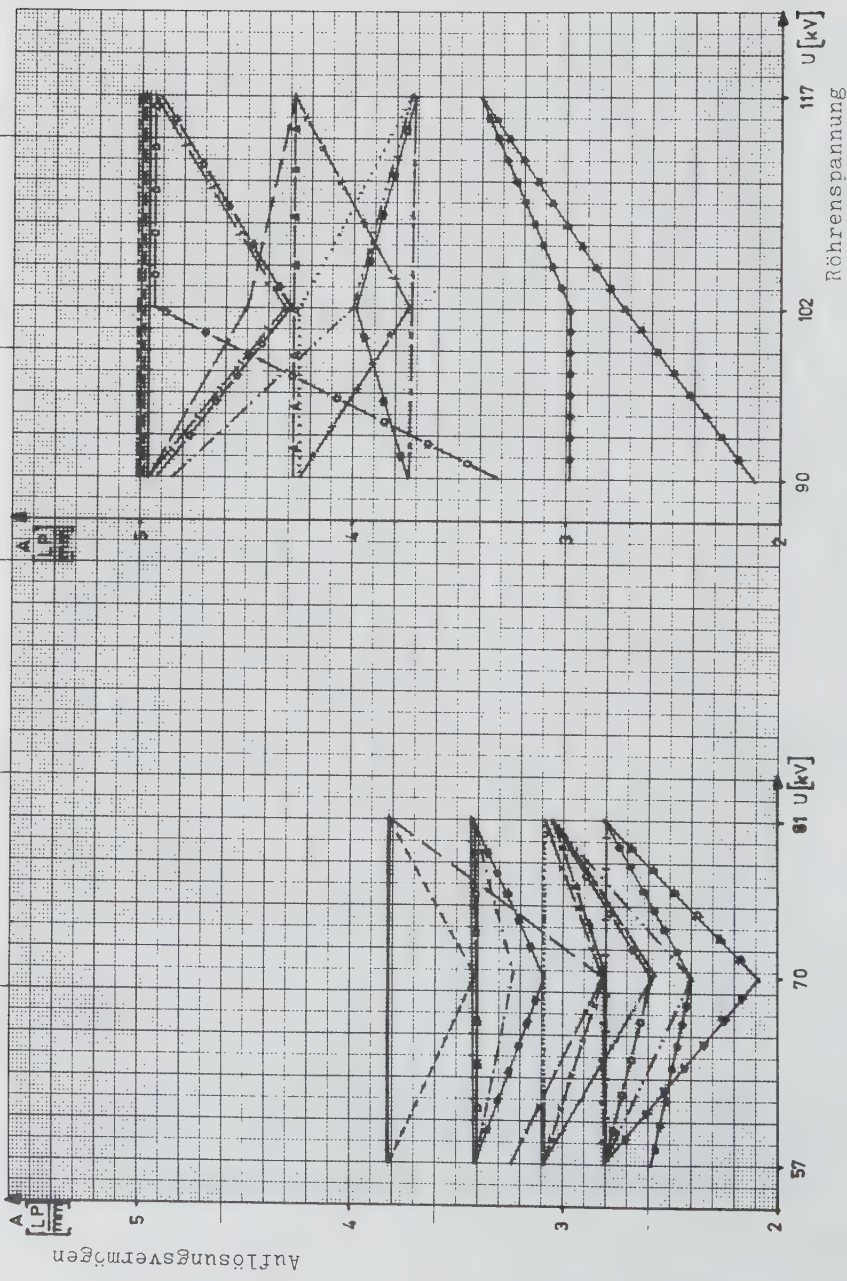


Abb. 26 Abhängigkeit des Auflösungsvermögens in LP/mm
von der Aufnahmespannung in kV (Brennfleckgröße:
 $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$)

Die Abb. 26 zeigt die Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von der Röhrenspannung, wobei zu beachten ist, daß für höhere Röhrenspannungen (90 kV, 102 kV, 117 kV) mit größerem FFA gearbeitet wurde.

Die Auflösung war für alle Kombinationen bei hoher Röhrenspannung und großem FFA besser als bei niedriger Röhrenspannung und kleinem FFA. Der Wert von 5 LP/mm wurde nur bei hoher Röhrenspannung und großem FFA erreicht. Dies dürfte auf die geringere geometrische Unschärfe bei größerem FFA und weniger auf die höhere Aufnahmespannung zurückzuführen sein.

Die niedrigsten Auflösungswerte besaßen wie erwartet die höchstverstärkenden SE-Kombinationen. Die höchsten Werte waren sowohl mit CaWO_4 -Kombinationen als auch mit SE-Kombinationen zu erreichen.

Auffallend war ein Abfall des Auflösungsvermögens sehr vieler Kombinationen bei 70 und 102 kV Röhrenspannung. Dieses Absinken des Auflösungsvermögens, das sowohl bei CaWO_4 - als auch bei SE-Kombinationen auftrat, könnte in Zusammenhang stehen mit einem höheren Rauschen in diesen Aufnahmen (Abb. 41). Dies würde die Erwartung bestätigen, daß ein höheres Maß an Rauschen - ungeachtet seiner Ursache - die Auflösungsfähigkeit vermindert.

Die Verkleinerung des Röhrenbrennflecks von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ auf $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ unter Verwendung einer Röhrenspannung von 57 kV führte bei allen untersuchten Kombinationen zu einer deutlichen Steigerung des Auflösungsvermögens. Dies ist auf die Abnahme der geometrischen Unschärfe zurückzuführen.

3.5.1.5. Abhängigkeit des Schwärzungsverlaufs von
der verwendeten Film-Folien-Kombination,
von der Röhrenspannung und von der Material-
stärke eines Aluminiumkeils

Um das Kontrastverhalten untersuchen zu können, war es nötig, auf einer Aufnahme möglichst viele Schwärzungswerte zu erhalten. Wie bereits beschrieben bildeten wir deshalb einen 3 bis 39 mm starken Aluminiumkeil mit Hilfe verschiedener Film-Folien-Kombinationen bei unterschiedlichen Röhrenspannungen ab. Durch die ansteigende Filterung, die der Al-Keil bewirkte, ergab sich auf den entwickelten Filmen eine Schwärzungstreppe. Die Schwärzungswerte der einzelnen Stufen dieser Treppe wurden mit dem Densitometer gemessen und in Diagrammen gegen die zugehörige Al-Filter-Stärke aufgetragen. Die Abbildungen 27, 28 und 29 enthalten die auf diese Weise bei verschiedenen Röhrenspannungen gewonnenen Schwärzungskurven.

Wie bereits Lissner (35) beschrieb, verlaufen diese Schwärzungskurven umso flacher, je höher die verwendete Aufnahmespannung ist. Diese Beobachtungen bestätigten die Untersuchungen für einen Bereich von 6 bis 21 mm Al-Filterung. Für eine Filterstärke von 0 bis 6 mm Al und ebenso für eine Filterstärke von mehr als 21 mm Al ergaben sich bei höherer Röhrenspannung steilere Abschnitte der Schwärzungskurven. Da der maximale und der minimale Schwärzungswert bei allen Aufnahmespannungen gleich war, bedeutet dies, daß die Kurven - über die gesamte Schwärzungs-

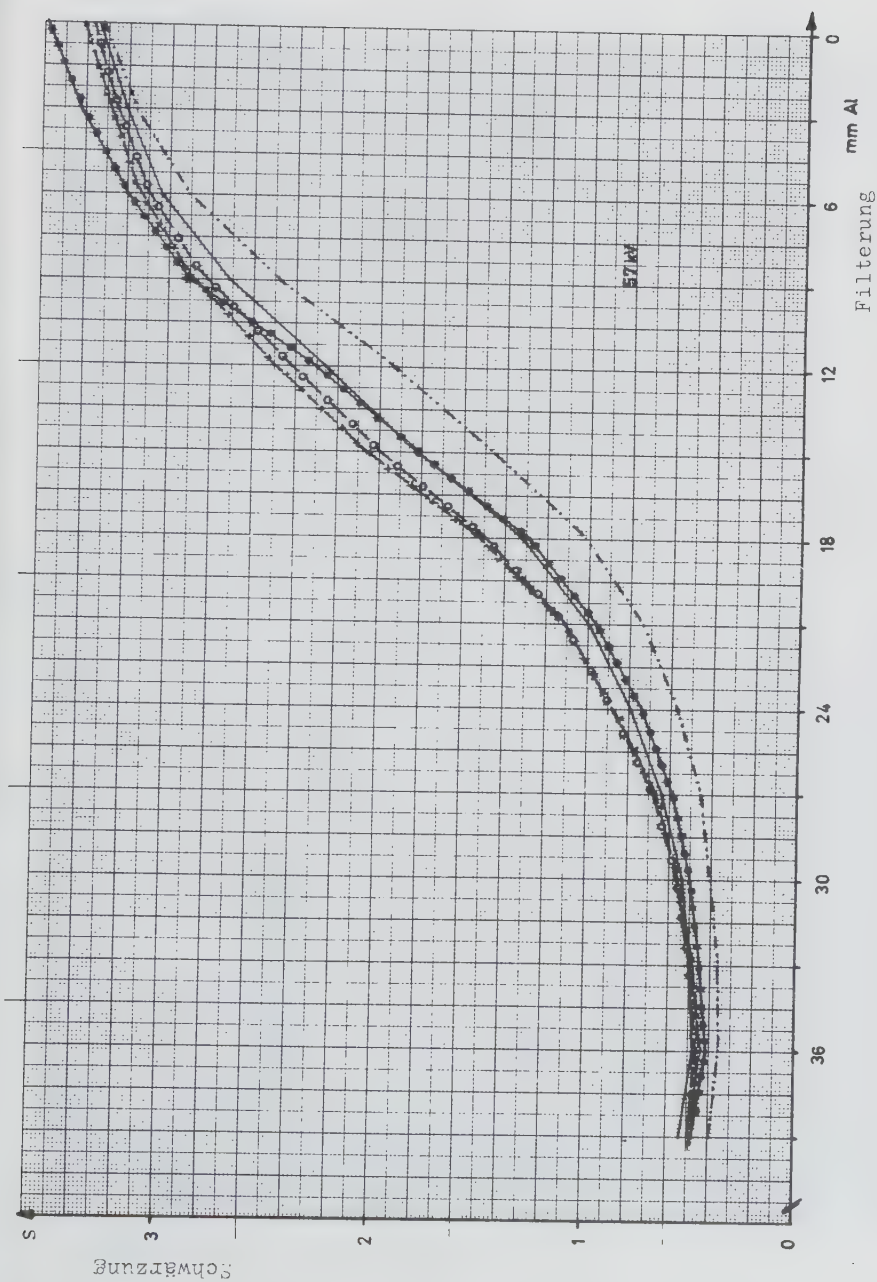


Abb. 27 Abhängigkeit der Filmschwärzung von der Materialstärke
eines Al-Keils. Röhrenspannung 57 kV

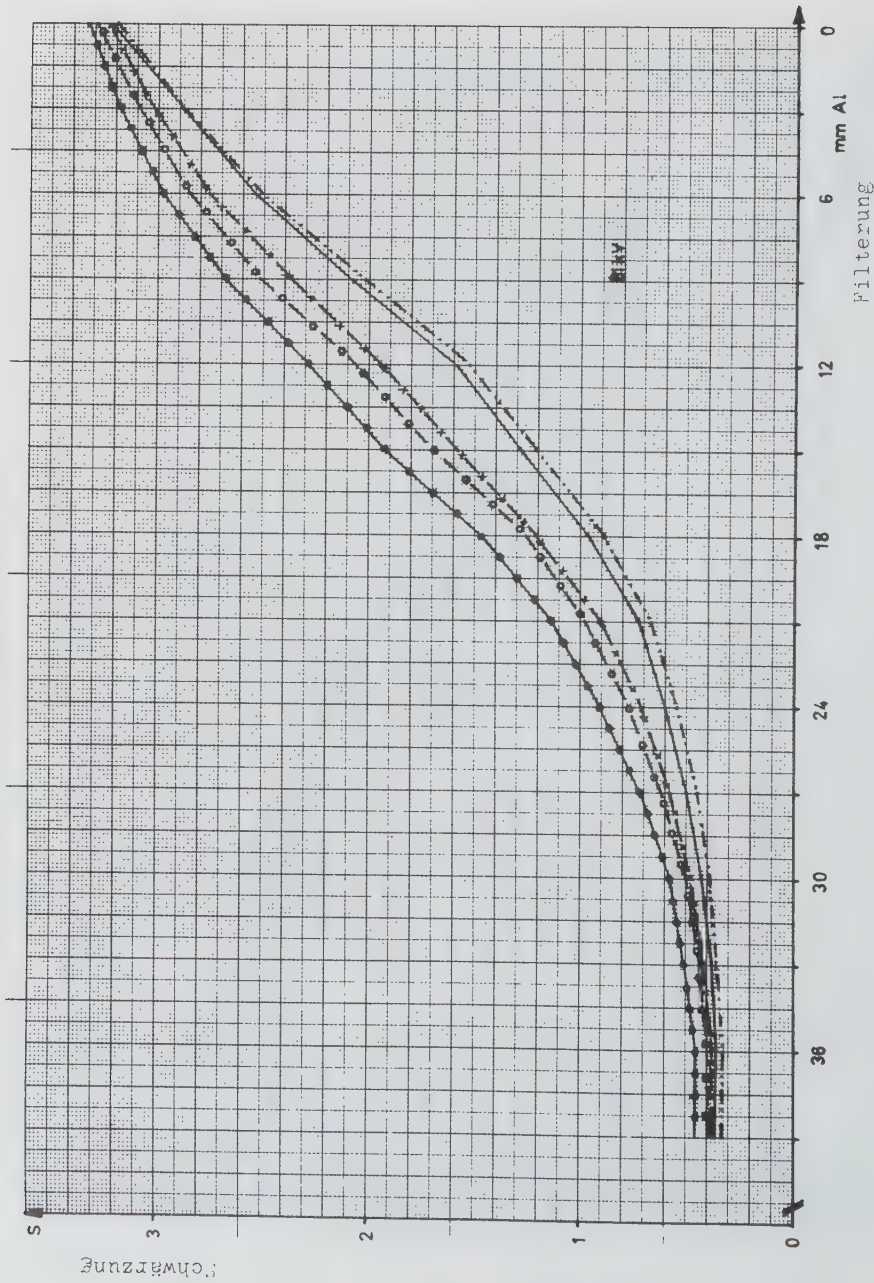


Abb. 28 Abhängigkeit der Filmschwärzung von der Materialstärke eines Al-K-Keils, Röhrenspannung 81 kV

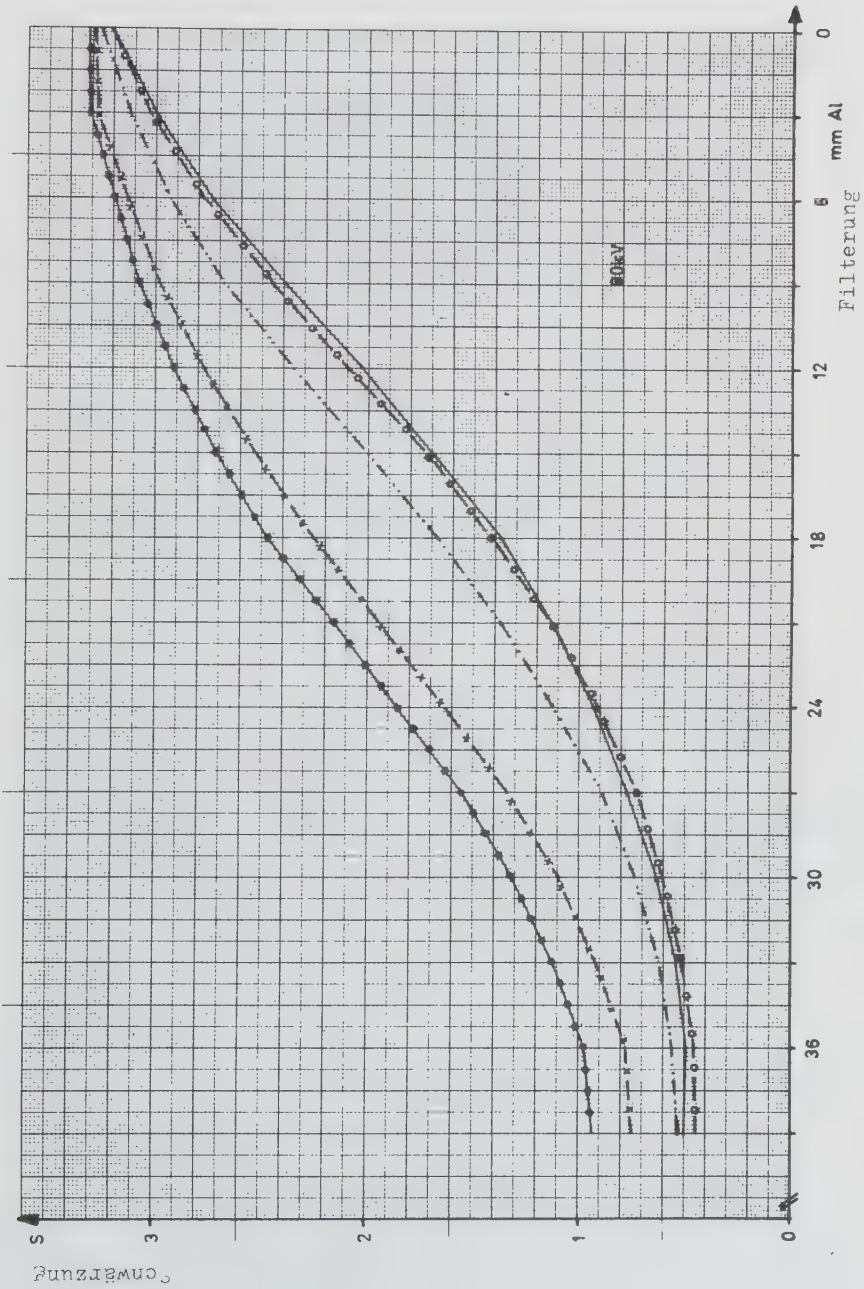


Abb. 29 Abhängigkeit der Filmschwärzung von der Materialstärke eines Al-Keils. Röhrenspannung 90 kV

terappe betrachtet - umso gleichmäßiger ansteigen, je höher die Röhrenspannung ist.

Für die Praxis folgt daraus, daß bei geringer Aufnahmespannung die Kontraste in Bereichen sehr starker und sehr schwacher Filterung kleiner sind als bei hoher Spannung.

Da es für die Praxis wünschenswert erscheint, in allen Filterungsbereichen ein gleichmäßiges Kontrastverhalten zu erreichen, ist dieses Untersuchungsergebnis ein Argument für höhere Aufnahmespannungen.

Vergleicht man die Kurven der einzelnen Kombinationen, so sind zumindest im Bereich mittlerer Schwärzung keine nennenswerten Unterschiede in der Steigung und damit in den bei der Abbildung zu erwartenden Kontrasten festzustellen. Ein deutlicher Unterschied im Kontrastverhalten zwischen CaWO_4 - und SE-Systemen war ebenfalls nicht nachzuweisen. Aus der Praxis ist jedoch bekannt, daß SE-Kombinationen im Vergleich mit CaWO_4 -Komb. ein unterschiedliches Kontrastverhalten in Abhängigkeit von der Röhrenspannung aufweisen können. Unter Umständen tritt dieser Effekt jedoch erst bei höheren als den von uns untersuchten Al-Filterstärken auf.

3.5.2. Versuch der Messung des Rauschens mit Hilfe eines objektiven Verfahrens

Da die Körnigkeit eines Röntgenbildes, die auch als Rauschen beschrieben wird, einen negativen Einfluß auf die Qualität der Röntgenaufnahme haben kann (siehe Abschn.2.3.4)

sollte auch das Rauschen Gegenstand dieser Untersuchung sein.

Es ist jedoch äußerst schwierig, das Rauschen bzw. die Körnigkeit einer Aufnahme subjektiv zu beurteilen. Deshalb wurde zu diesem Zweck ein objektives Verfahren mit normiertem Aufnahmeobjekt und maschineller Auswertung gewählt.

3.5.2.1. Die Standardabweichung im Mikrodensitogramm

3.5.2.1.1. Theoretische Überlegungen

Um Aussagen über das Rauschen eines Abbildungssystems (Definition siehe Abschn. 2.4.4.2.3.) machen zu können, ist es notwendig, die Schwärzungsschwankungen - die ja das Rauschen ausmachen - in einem mit Hilfe des zu beurteilenden Abbildungssystem hergestellten Bild zu messen. Um die störenden Einflüsse möglichst gering zu halten, ist es zweckmäßig, für diese Messungen einen Bereich des Röntgenbildes auszuwählen, der eine durch gleichmäßigen Strahlungseinfall hervorgerufene homogene Schwärzung aufweist.

Die Messung der Schwärzungsunterschiede erfolgt mit Hilfe des Mikrodensitometers. Dieses Gerät mißt die Intensität eines Lichtstrahls vor und nach dem Durchtritt durch das zu untersuchende Röntgenbild und bildet das Verhältnis dieser beiden Werte. Der Lichtstrahl durchdringt den Film bei der Messung senkrecht.

Variabel ist der Querschnitt des Lichtstrahls, der durch Blenden und Linsensysteme verändert werden kann.

Das Verhältnis der Intensitätswerte des Lichtstrahls vor und nach dem Durchtritt durch den Film ist ein Maß für die Schwärzung des untersuchten Filmareals.

Bewegt man den Film mit gleichbleibender Geschwindigkeit im Lichtstrahl und verbindet man das Mikrodensitometer mit einem x-y-Schreiber, so ergeben die einzelnen Schwärzungswerte eine Kurve, die um einen Mittelwert schwankt, das sogenannte Mikrodensitogramm oder kürzer Densitogramm.

Da das Rauschen ein statistisches Phänomen ist und die Mikrodensitogramme bildlich gesprochen "Fingerabdrücke" des Rauschens darstellen, sollte eine statistische Untersuchung der Mikrodensitogramme Rückschlüsse auf das Rauschen zulassen.

In der vorliegenden Arbeit wurde zu diesem Zweck die in der Statistik verwendete "Standardabweichung" herangezogen. Die Standardabweichung σ stellt ein Maß dar für die Höhe und die Häufigkeit der Abweichung eines Kollektivs von Meßwerten vom Mittelwert dieser Meßwerte.

In der Mikrodensitometrie ist dieses Kollektiv von Meßwerten nichts anderes als das Mikrodensitogramm, wobei für die Standardabweichung σ die folgende Beziehung gilt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n - 1}}$$

S_i steht dabei für den einzelnen mikrodensitometrischen Schwärzungswert, S ist der Mittelwert aller Meßwerte eines Mikrodensitogramms, praktisch also die mittlere Schwärzung im untersuchten Filmareal, und n steht für die Anzahl der Meßwerte eines Mikrodensitogramms.

Die Standardabweichung σ wurde in der vorliegenden Arbeit als Maß für das Rauschen verwendet. Auch andere Autoren (1, 20, 21, 51) benützten sie zur Messung des Rauschens von Film-Folien-Systemen. Alle genannten Autoren geben für diese Messungen an, daß die Beziehung

$$\sigma_F^2 \times F = \text{const}$$

erfüllt sein muß. Diese Konstante wird als Selwyn-Körnigkeit (51) bezeichnet und ist bei gleichbleibenden Aufnahmebedingungen für jedes Film-Folien-System eine konstante Größe. Im einzelnen bedeuten in der oben angegebenen Beziehung:

F : Querschnittsfläche des Mikrodensitometer-Lichtstrahls in Filmebene

σ_F : Standardabweichung bei der verwendeten Querschnittsfläche F

Für die Praxis bedeutet dies, daß die Standardabweichung umso größer wird, je kleiner man den Querschnitt des zur mikrodensitometrischen Messung verwendeten Lichtstrahls wählt. Zur Veranschaulichung:

Ist die Meßfläche im Film wesentlich größer als die kleinen Schwärzungsflecken, die das Rauschen ausmachen, so sind die vom Mikrodensitometer registrierten Schwärzungsschwankungen sehr klein und damit bleibt die Amplitude des Mikrodensitogramms sehr klein.

Ist dagegen die Meßfläche im Film mit der Größe der Schwärzungsflecken annähernd identisch, so ergeben sich im Mikrodensitogramm große Schwankungen, da das Licht beim Auftreffen auf einen Schwärzungsfleck sehr stark geschwächt wird während es beim Auftreffen auf einen Zwischenraum, der nicht geschwärzt ist, fast nicht geschwächt wird:

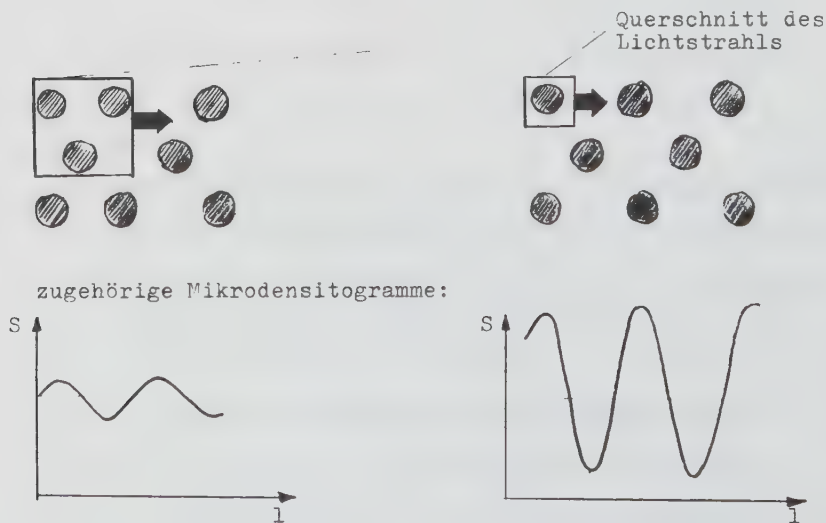


Abb. 30 Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude des Mikrodensitogramms von der Meßfläche des Mikrodensitometers

Abb. 30 zeigt die Abhängigkeit der Amplitude des Mikrodensitogramms von der Querschnittsfläche des Lichtstrahls in Filmebene. Bewegt man das Quadrat, das die Meßfläche darstellt, in beiden Fällen mit gleicher Geschwindigkeit über den Film, dessen Schwärzungspunkte durch die dunklen Kreisflächen dargestellt sind, so ergibt sich für die kleinere Meßfläche eine größere Mikrodensitogramm-Amplitude als für die größere Meßfläche. In Abb. 30 bedeuten S die Schwärzung und l die Meßstrecke des Mikrodensitometers.

In Wirklichkeit setzt sich jedoch die Gesamtschwärzung einer Röntgenaufnahme nicht aus gleich großen und regelmäßig angeordneten Schwärzungsflecken zusammen. Es läßt sich aber aus Abb. 30 ableiten, daß die Amplitude des Mikrodensitogramms nur solange ansteigen kann, bis sie den Meßwert für die Schwärzung eines Schwärzungsflecks erreicht hat. Verkleinert man also die Meßfläche eines Densitometers, so steigt die Amplitude im Densitogramm nur so lange an, bis die Meßfläche identisch ist mit der Größe der kleinsten Schwärzungsflecken im Film.

Für die praktische Durchführung der Untersuchungen bedeutet dies, daß die kleinste Meßfläche gefunden werden muß, für die die Bedingung $\sigma_F^2 \times F = \text{const.}$ noch erfüllt ist.

Eine weitere Voraussetzung für die Durchführung war die Beantwortung der Frage, ob die Standardabweichung von der mittleren Schwärzung der Filme abhängig ist.

3.5.2.1.2. Praktische Durchführung der Messungen

Die mit Hilfe der verschiedenen Film-Folien-Kombinationen hergestellten Röntgenbilder des Phantoms sollten mit dem zur Verfügung stehenden Mikrodensitometer und einem Elektronenrechner auf ihr Rauschen hin untersucht werden.

Alle Mikrodensitogramme wurden im Schwärzungsbereich C (siehe Abb. 18) der Aufnahmen angefertigt, der eine mittlere Schwärzung von $S = 1 \pm 10 \%$ aufwies. Er war durch eine Filterung von 11 cm Plexiglas homogen geschwärzt. Die gewonnenen Mikrodensitogramme wurden per Hand an einem x-y-Koordinaten-Erfassungstisch digital umgewandelt und in einen Rechner eingegeben.

Die Abb. 31 und 32 zeigen Beispiele für Mikrodensitogramme, die mit verschiedenen Meßspaltgrößen gewonnen wurden.

Von jedem Mikrodensitogramm wurde ein Abschnitt von 20 cm, der in Abb. 32 als Meßstrecke bezeichnet ist, durch den Rechner ausgewertet. Das Gerät bestimmte zunächst in jedem Mikrodensitogramm eine Grundlinie, die der mittleren Schwärzung entsprach. Für diese Grundlinie gilt, daß die von der Kurve und der Grundlinie eingeschlossenen Flächen zu beiden Seiten der Grundlinie gleich groß sind. Anschließend ermittelte der Rechner die Standardabweichung der einzelnen Kurvenpunkte des Mikrodensitogramms von der Grundlinie und druckte gleichzeitig noch den Wert σ^2 , der als Varianz (1) bezeichnet wird, aus.

Zunächst wurde untersucht, bei welcher kleinstmöglichen Meßfläche in Filmebene die Bedingung $\sigma_F^2 \times F = \text{const.}$ noch erfüllt war.

Im Anschluß daran wurde untersucht, ob die Schwankung der mittleren Schwärzung von $\pm 10\%$ um den Wert $S = 1$ im Bereich C der Aufnahmen einen Einfluß auf die ermittelte Standardabweichung bzw. Varianz besitzt.

Nach Abschluß dieser Vorbereitungen wurden sämtliche Aufnahmen, die mit den verschiedenen Film-Folien-Systemen nach der in Abschn. 3.3. beschriebenen Methode hergestellt worden waren, mittels Mikrodensitometer und Rechner mit Hilfe der ermittelten optimalen Meßfläche untersucht.

3.5.2.1.2.1. Bestimmung der optimalen Meßfläche des Mikrodensitometers

Die Angaben in der Literatur über die zur Untersuchung des Rauschens verwendeten mikrodensitometrischen Meßflächen sind sehr unterschiedlich.

Biedermann und Frieser (7) empfehlen, einen möglichst großen Lichtspalt zu verwenden und geben eine Größe von $10 \times 500 \mu\text{m}^2$ bis $30 \times 1000 \mu\text{m}^2$ an.

Friedrich und Weskamp (20, 21) führten Film-Folien-Untersuchungen mit einer Meßfläche von $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ durch, während Hagemann und Mitarb. (24) eine Spaltfläche von $2,0 \times 0,2 \text{ mm}^2$ verwendeten.

Alle genannten Autoren geben an, daß die Bedingung $\sigma_F^2 \times F = \text{const.}$ erfüllt sein muß, d.h. daß das Produkt aus der Varianz und der Spaltfläche des Densitometers nicht von der Spaltfläche des Densitometers abhängig sein darf.

Um festzustellen, bei welchen Spaltabmessungen diese Bedingung gültig ist, wurden von mehreren Aufnahmen des Phantoms Mikrodensitogramme mit unterschiedlicher Spaltgröße geschrieben. Anschließend wurde für jedes Mikrodensitogramm mit Hilfe des Rechners die Standardabweichung und die Varianz bestimmt.

Zunächst wurden Spaltgrößen von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$, $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$, $0,33 \times 0,33 \text{ mm}^2$, $0,47 \times 0,47 \text{ mm}^2$ und $0,575 \times 0,575 \text{ mm}^2$ verwendet. Abb. 31 zeigt das Mikrodensitogramm einer Phantomaufnahme, das mit einer Meßfläche von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ in Filmebene angefertigt wurde, während das Mikrodensitogramm in Abb. 32 mit einer Spaltfläche von $0,33 \times 0,33 \text{ mm}^2$ geschrieben wurde.

In den Abb. 31 und 32 ist der Kurvenbereich der vom Rechner ausgewertet wurde, durch zwei senkrechte Linien angegeben. Dieser Abschnitt entspricht einer Meßstrecke von 10 mm in Filmebene.

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Amplitude des Mikrodensitogramms mit zunehmendem Querschnitt des Mikrodensitometer-Lichtstrahls abnimmt. Dies zeigte sich auch in der vom Rechner ermittelten Standardabweichung σ , die für eine Spaltabmessung von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ bei 17,5 lag, während sie für eine Spaltgröße von $0,33 \times 0,33 \text{ mm}^2$ nur 7,1 betrug. Die Untersuchungen mit variabler Spaltgröße ergaben, daß im Bereich einer Meßflächengröße von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ bis $0,575 \times 0,575 \text{ mm}^2$ die Bedingung $\sigma_F^2 \times F = \text{const.}$ nicht erfüllt war.

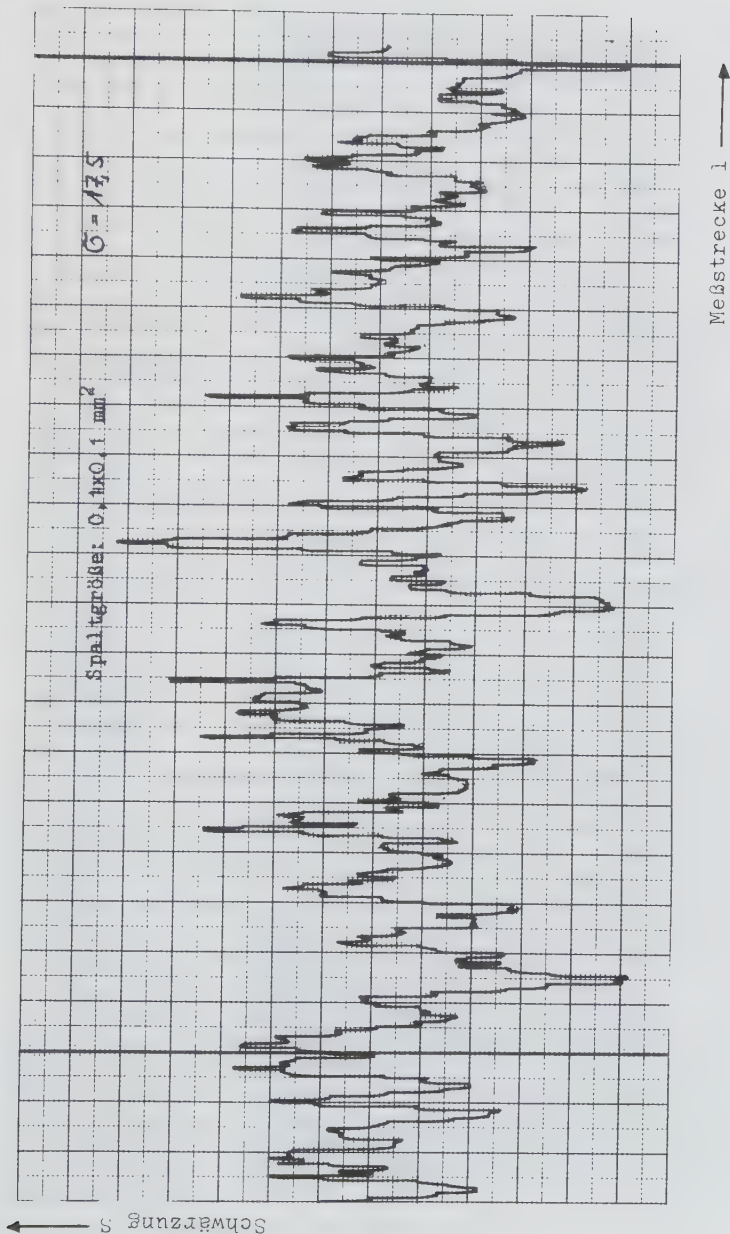


Abb. 31 Mikrodensitogramm eines homogen geschwärzten Filmbereichs bei einem Mikrodensitometer-Spalt von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ in Filmebene

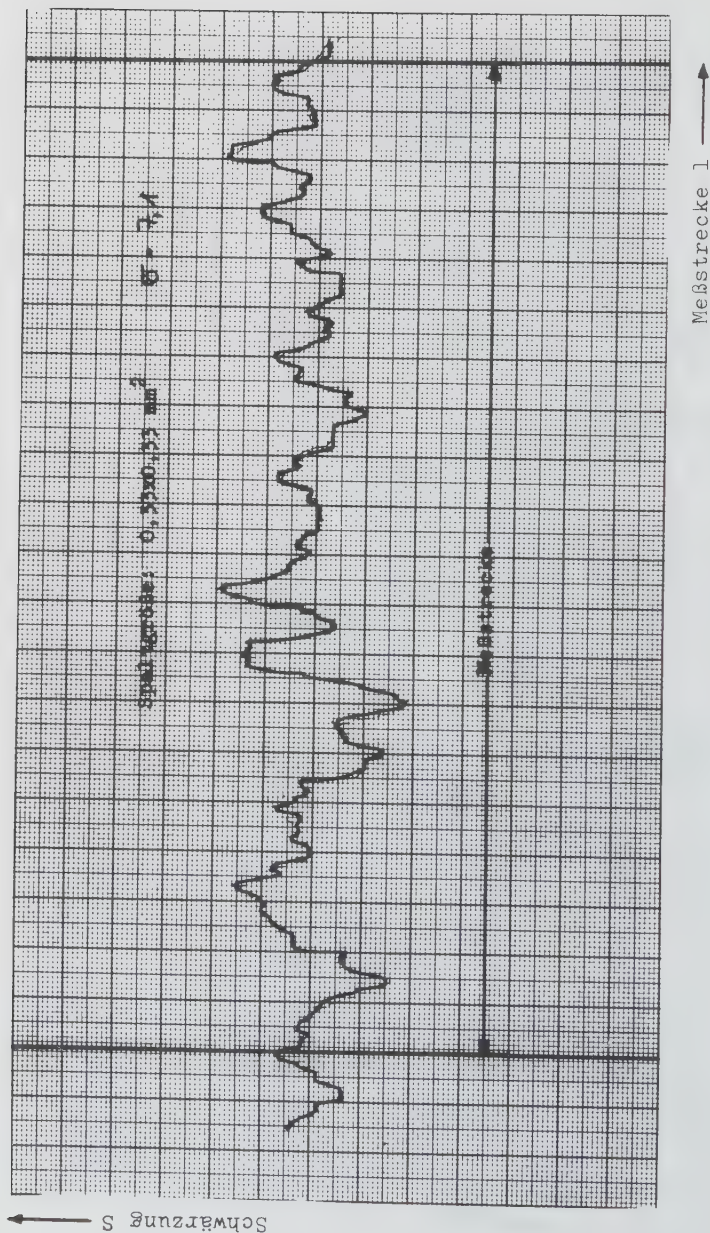


Abb. 32 Mikrodensitogramm eines homogen geschwärzten Filmbereichs bei einem Mikrodensitometer-Spalt von 0,33 x 0,33 mm² in Filmebene

Abb. 33 zeigt die Abhängigkeit des Produkts $\sigma_F^2 \times F$ von der verwendeten Spaltfläche für die Kombinationen A und K bei unterschiedlicher Röhrenspannung und Brennfleckgröße. Es zeigte sich, daß das Produkt $\sigma_F^2 \times F$ im Bereich einer Spaltgröße von $0,01 \text{ mm}^2$ bis $0,33 \text{ mm}^2$ nicht von der Spaltgröße unabhängig war, sondern mit zunehmender Meßfläche anstieg. Die Spaltabmessung mußte demzufolge noch größer gewählt werden. Da das zur Verfügung stehende Mikrodensitometer quadratische Meßflächen nur bis zu einer Größe von $0,575 \times 0,575 \text{ mm}^2$ erlaubte, wurde ab diesem Zeitpunkt mit rechteckiger Spaltgeometrie gearbeitet. Auf diese Weise wurden Spaltabmessungen bis zu $0,575 \times 1,15 \text{ mm}^2$ möglich.

Wie Abb. 34 deutlich macht, in der die Abhängigkeit des Produkts $\sigma_F^2 \times F$ von der Meßfläche des Mikrodensitometers für eine Spaltgröße bis $0,575 \times 1,15 \text{ mm}^2$ dargestellt ist, verläuft diese Kurve mit zunehmender Spaltgröße immer flacher.

Die Untersuchungen haben ergeben, daß für eine Spaltfläche von $F \geq 0,4 \text{ mm}^2$ die Bedingung $\sigma_F^2 \times F = \text{const.}$ näherungsweise erfüllt ist.

Dies entspricht den Untersuchungen von Hagemann und Mitarb. (24), die Messungen bei einer Spaltgröße von $0,4 \text{ mm}^2$ durchführten.

Auf Grund dieser Ergebnisse wurden alle weiteren Mikrodensitogramme mit einer Spaltabmessung von $0,575 \times 1,15 \text{ mm}^2$ angefertigt. Abb. 35 zeigt ein mit dieser Spaltgröße von $0,66 \text{ mm}^2$ geschriebenes Mikrodensitogramm einer homogen geschwärzten Bildstelle. Zwischen den eingezeichneten senk-

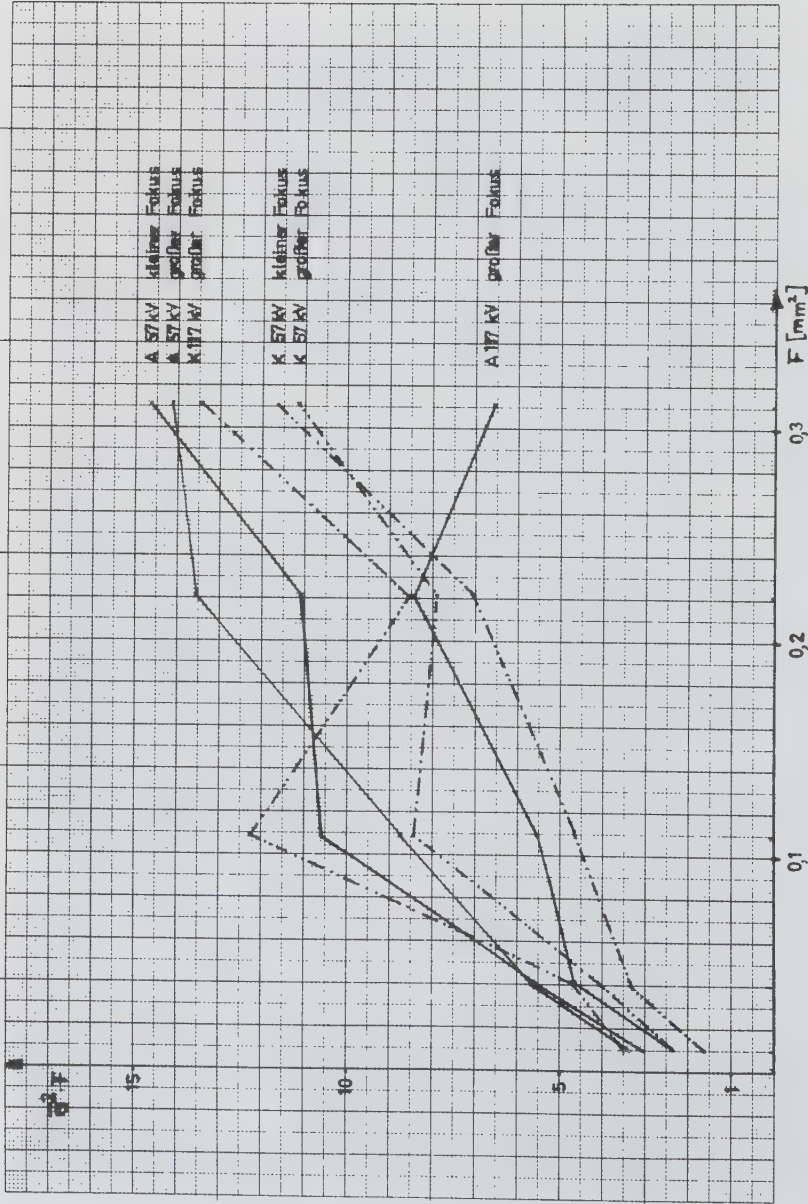


Abb. 33 Abhängigkeit des Produkts aus Varianz und Mikrodensitometer-Meßfläche von der Spaltgröße des Mikrodensitometers

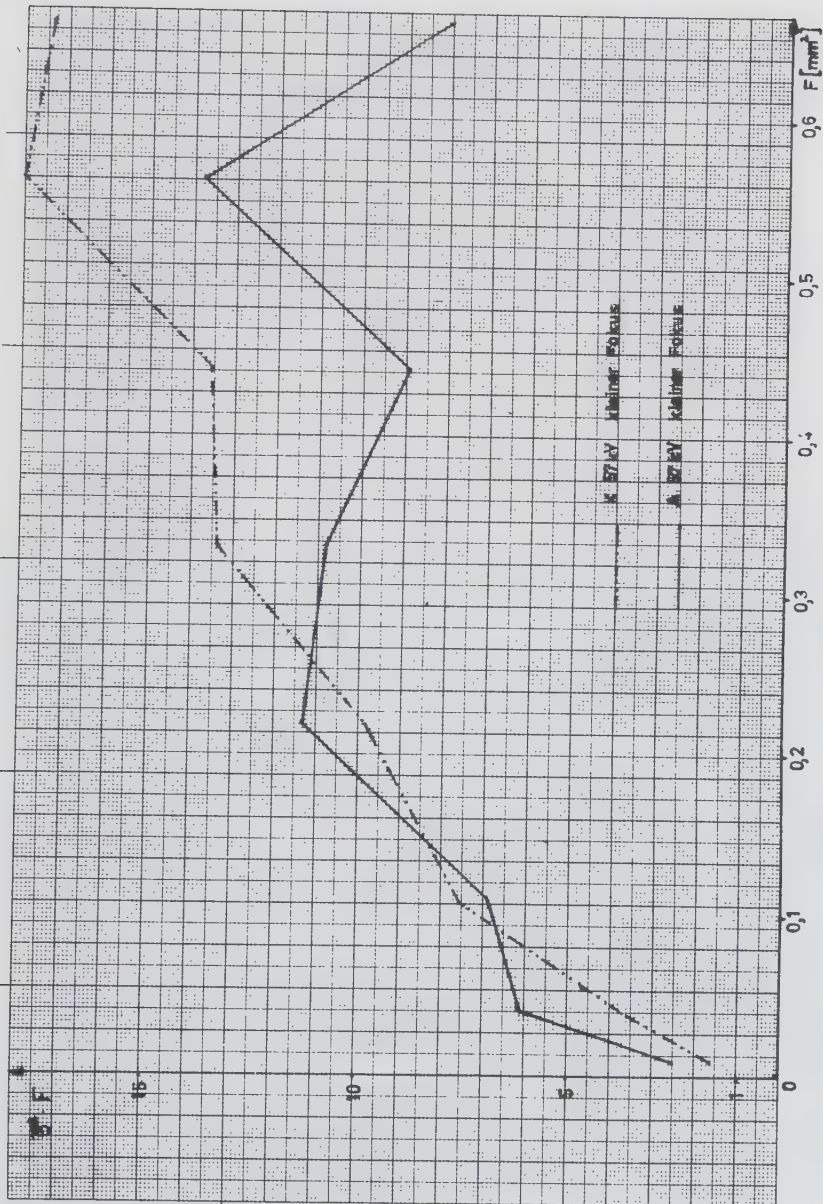


Abb. 34 Abhängigkeit des Produkts aus Varianz und Mikrodensitometer-Meßfläche von der Spaltgröße des Mikrodensitometers

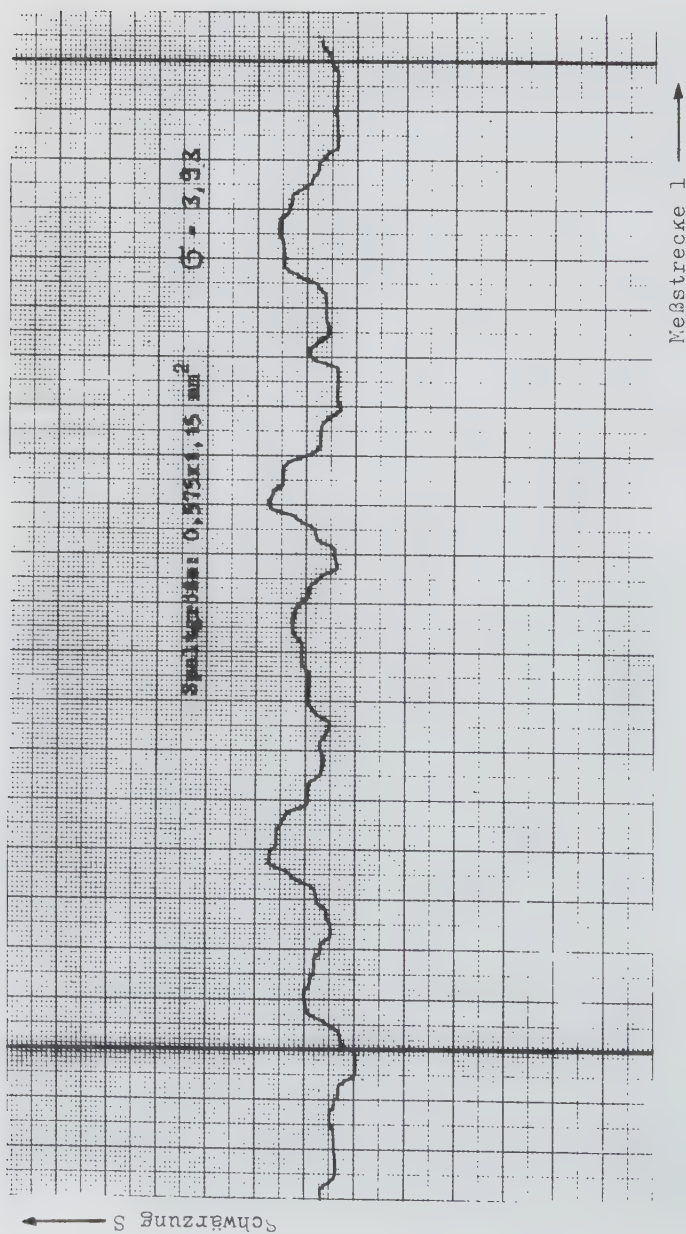


Abb. 35 Mikrodensitogramm eines homogen geschwärzten Filmbereichs bei einer Meßfläche des Mikrodensitometers von $0,575 \times 1,15 \text{ mm}^2$

rechten Linien ermittelte der Rechner eine Standardabweichung von $\sigma = 3,93$.

3.5.2.1.2.2. Abhängigkeit der Standardabweichung von der Schwärzung

Um zu überprüfen, ob die geringen Schwärzungsunterschiede der vom Phantom angefertigten Röntgenbilder einen Einfluß auf die Standardabweichung besitzen, wurde auf verschiedene Film-Folien-Kombinationen ein 0-15 mm starker Aluminiumkeil aufbelichtet. Die entwickelten Filme wiesen laut Messung mit dem Densitometer Macbeth Quanta Log eine mittlere Schwärzung von $S = 0,5$ bis $S = 2,2$ auf.

Im Abstand von 0,2 Schwärzungsstufen wurden von diesen Aufnahmen Mikrodensitogramme angefertigt und anschließend bezüglich ihrer Standardabweichung mit Hilfe des Rechners ausgewertet.

Wie die Abb. 36 für die Kombinationen A und B zeigt, steigt die Standardabweichung bis zu einer mittleren Schwärzung von $S = 0,9$ an, während sie im Bereich einer mittleren Schwärzung von $S = 0,9$ bis $S = 2,2$ nicht von der Schwärzung der Aufnahme abhängig ist.

Für die folgende Untersuchung des Rauschens bedeutete dies, daß die zugelassene Schwankung der Schwärzung von $\pm 10\%$ um den Wert $S = 1$ im Bereich C der Phantomaufnahmen keinen Einfluß auf die Standardabweichung hat.

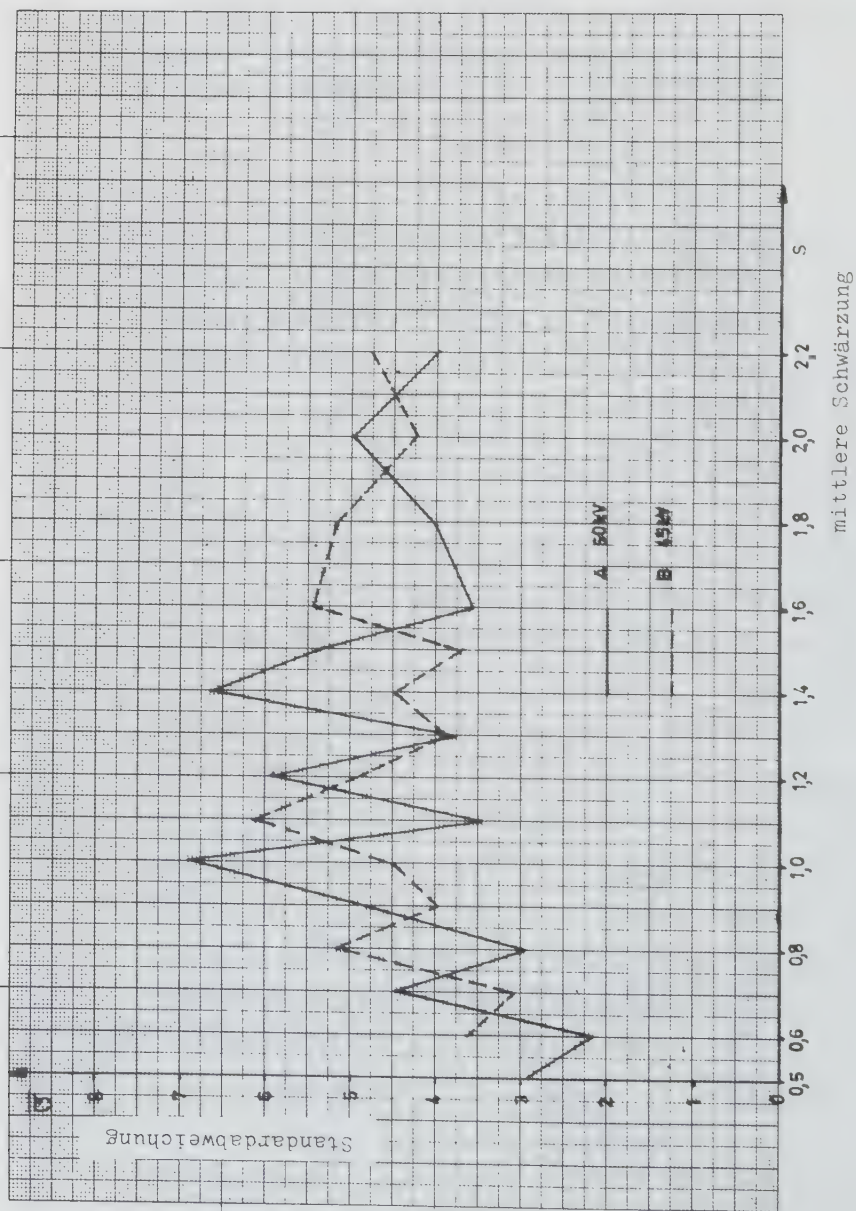


Abb. 36 Die Abhängigkeit der Standardabweichung σ von der mittleren Schwärzung S

3.5.2.1.2.3. Anfertigen der Mikrodensitogramme

Nach Abschluß dieser Vorarbeiten wurden von jeder Phantomaufnahme, die mit den verschiedenen Film-Folien-Systemen nach der in Abschnitt 3.3. beschriebenen Methode angefertigt worden war, Mikrodensitogramme geschrieben.

Um definierte geometrische Bedingungen zu schaffen, wurde dazu in jeder Aufnahme der Bereich C (siehe Abb. 18) verwendet, der durch 11 cm Plexiglas hindurch von der Röntgenstrahlung homogen geschwärzt worden war.

Von jeder Aufnahme wurden nach der in Abb. 37 gezeigten Methode drei Mikrodensitogramme geschrieben.

Die Spaltgröße des Mikrodensitometers betrug bei allen Messungen $0,575 \times 1,15 \text{ mm}^2$ in Filmebene.

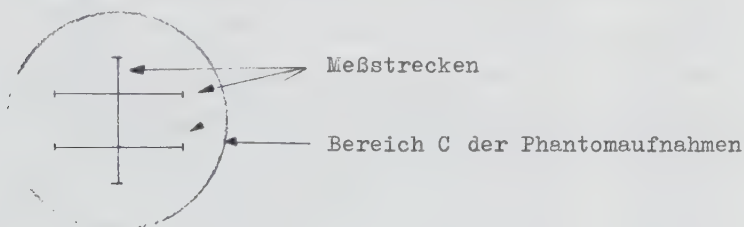


Abb. 37 Anordnung der mikrodensitometrischen
Meßstrecken im Bereich C der Phantom-
aufnahmen

3.5.2.1.2.4. Auswertung der Mikrodensitogramme mit Hilfe eines Rechners

Von jedem dieser Mikrodensitogramme wurde anschließend ein Abschnitt von 20 cm mit Hilfe eines x-y-Koordinaten-Erfassungstisches in einen Elektronenrechner eingespeist. Dies entspricht einer Meßstrecke von 10 mm in Filmebene. Wie bereits beschrieben wurde, ermittelte der Rechner zunächst eine Grundlinie, für die gilt, daß die Summe der von der Grundlinie und der Mikrodensitometer-Kurve eingeschlossenen Flächen zu beiden Seiten der Grundlinie gleich groß ist. Anschließend berechnete das Gerät die Standardabweichung der Kurve von der Grundlinie und das Quadrat aus der Standardabweichung σ , die Varianz σ^2 . Da von jeder Aufnahme drei Mikrodensitogramme geschrieben worden waren, bildeten wir aus den gewonnenen drei σ -Werten den Mittelwert $\bar{\sigma}$, der im folgenden als "mittlere Standardabweichung" bezeichnet wird.

Abb. 38 zeigt eines der Mikrodensitogramme, die mit einer Spaltgröße von $0,575 \times 1,15 \text{ mm}^2$ geschrieben wurden. Eingezeichnet in die Abb. ist der Abschnitt, der dem Rechner eingegeben wurde, die vom Rechner ermittelte Grundlinie und die berechnete Standardabweichung von $\sigma = 5,45$.

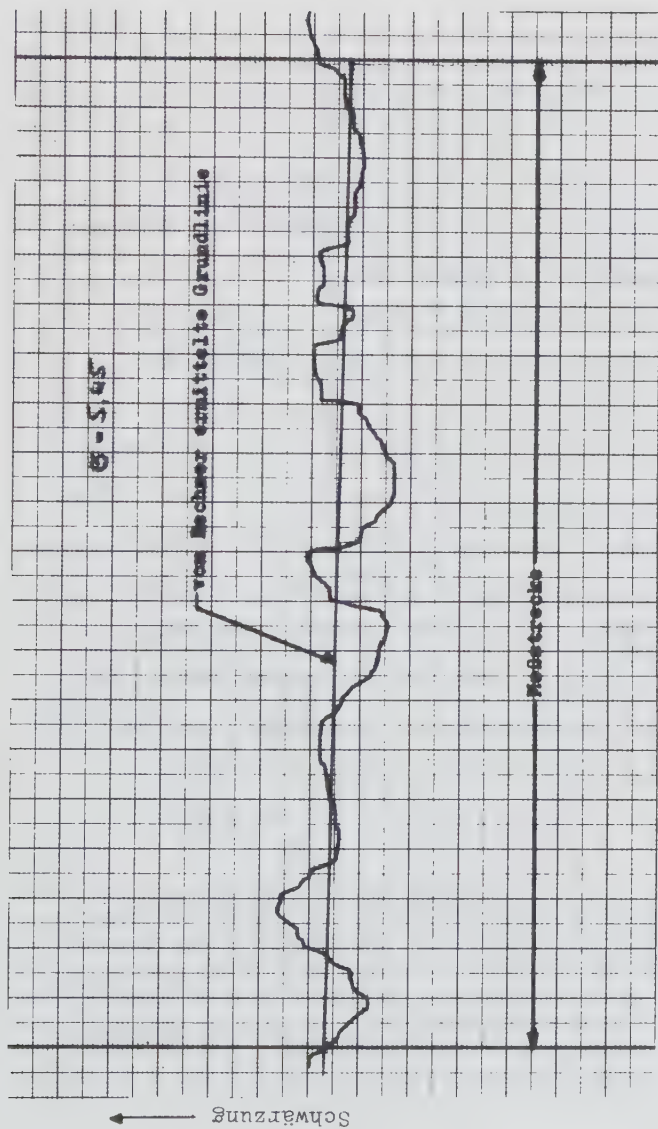


Abb. 38 Mikrodensitogramm des Bereiches C einer
Phantomaufnahme mit der vom Rechner ermittelten
Grundlinie

3.5.2.2. Ergebnisse dieser Messungen

In Tabelle 11 sind die Werte der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}$ zusammengefaßt, die der Rechner für die mit Hilfe der einzelnen Film-Folien-Kombinationen bei verschiedenen Aufnahmespannungen angefertigten Phantomaufnahmen ermittelte.

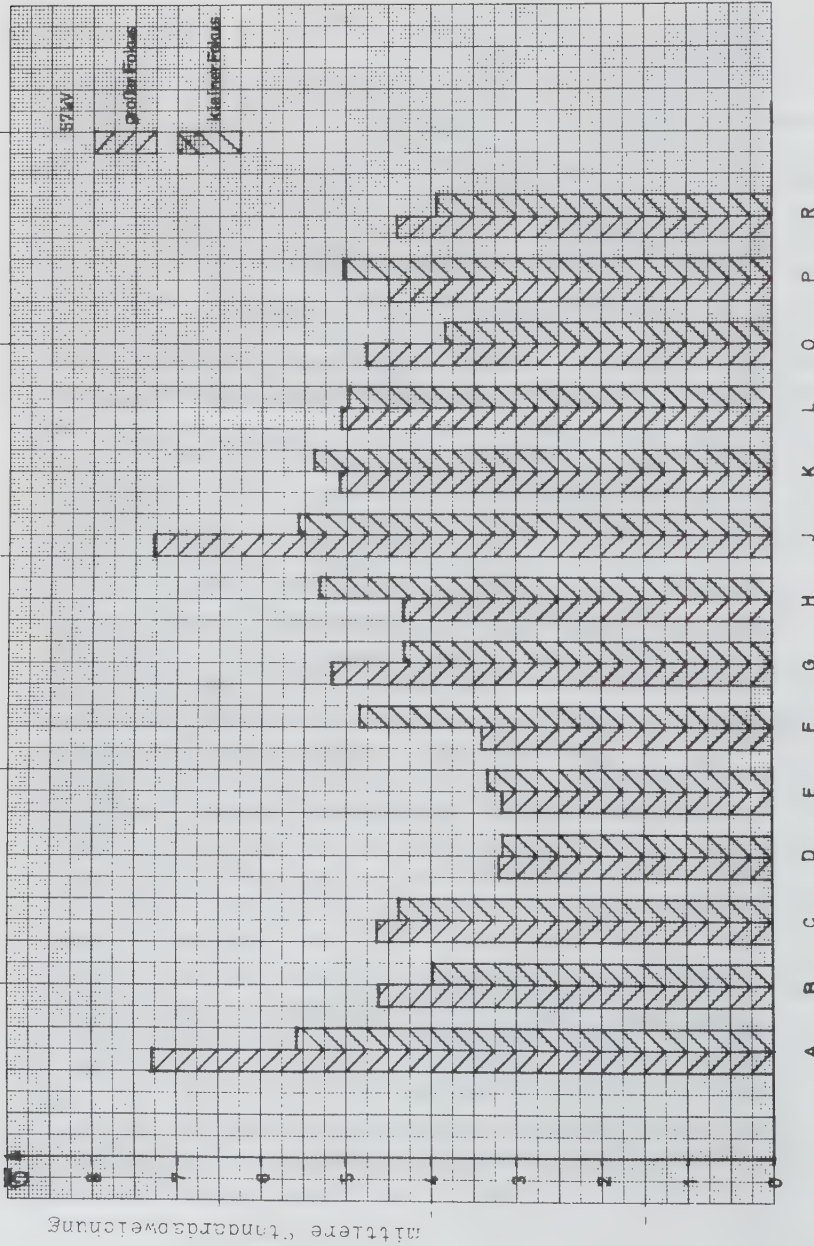
Die Meßwerte der Standardabweichung von der durch den Rechner bestimmten Grundlinie im Mikrodensitogramm sind in mm angegeben. Tabelle 11 enthält nur die mittlere Standardabweichung derjenigen Aufnahmen, die mit einer Brennfleckabmessung von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ belichtet worden waren.

Abb. 39 zeigt einen Vergleich der mittleren Standardabweichungen der Phantomaufnahmen, die bei 57 kV Röhrenspannung mit unterschiedlicher Brennfleckgröße angefertigt worden waren. Es ergibt sich daraus, daß ein einfach zu beschreibender Zusammenhang zwischen der verwendeten Brennfleckgröße der Röntgenröhre und der nach dem beschriebenen Verfahren ermittelten Standardabweichung nicht nachweisbar war. In den Abb. 40 bis 44 ist die Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung von der verwendeten Aufnahmespannung dargestellt.

Da der FFA bei 57 kV, 70 kV und 81 kV 115 cm betrug, während er bei 90 kV, 102 kV und 117 kV auf 150 cm eingestellt war, wurden die Diagramme in zwei Abschnitte geteilt, die sich sowohl durch den FFA als auch durch die Aufnahme-

Film- Folien- Kombination \ Röhren- spannung [kV]	57	70	81	90	102	117
A	5,53	4,90	3,10	3,67	4,30	3,85
B	4,63	4,04	3,35	2,81	3,05	3,39
C	4,64	4,38	3,81	3,87	6,10	4,38
D	3,20	3,41	3,30	3,33	3,40	3,62
E	3,17	3,75	4,06	3,05	3,87	3,45
F	3,40	4,16	3,39	4,20	4,67	4,35
G	5,17	3,33	3,92	3,91	4,05	4,25
H	4,33	5,78	4,73	3,87	5,24	5,25
I	7,26	4,44	4,42	5,46	6,03	7,16
K	5,09	4,86	5,03	4,49	6,00	5,68
L	5,06	4,30	5,77	5,03	4,93	4,67
N	5,01	4,15	3,46	4,20	5,52	4,24
O	4,76	5,35	4,08	5,44	4,23	4,68
P	4,50	4,65	4,87	4,49	4,94	4,61
Q	4,25	4,02	5,29	4,20	4,69	4,84
R	4,40	6,60	5,93	4,75	4,45	4,25

Tabelle 11 Die mittlere Standardabweichung der mit den verschiedenen Film-Folien-Kombinationen angefertigten Phantomaufnahmen (in mm Abweichung von der Grundlinie in den Mikrodensitogrammen)



Kennbuchstaben der
Film-Folien-Kombinationen

Abb. 39 Vergleich der mittleren Standardabweichung bei
unterschiedlicher Brennfleckgröße der Röntgenröhre.

Aufnahmespannung: 57 kV FFA 115 cm

Brennfleck: groß: 1,2 x 1,2 mm² klein: 0,6 x 0,6 mm²

spannung unterscheiden. Dies entsprach den Praxisbedingungen, da zum Zeitpunkt der Untersuchungsdurchführung routinemäßig bei höheren Aufnahmespannungen an einem Wandstativ mit FFA = 150 cm und bei niedrigen Röhrenspannungen an einem Tischgerät mit FFA = 115 cm gearbeitet wurde (siehe Abschnitt 3.3.).

Die mit dem beschriebenen Verfahren gemessene mittlere Standardabweichung lag für die untersuchten Film-Folien-Kombinationen in einem Bereich zwischen 2,81 und 7,26 mm.

In Abb. 40 sind die Meßwerte der mittleren Standardabweichung für alle untersuchten Film-Folien-Kombinationen in Abhängigkeit von der Röhrenspannung dargestellt.

Zum Zweck der besseren Detaillierkennbarkeit wurde in Abb. 41 die Ordinate gestreckt. In den Abb. 42, 43 und 44 sind dieselben Meßwerte aus Gründen der Übersichtlichkeit noch einmal nach Herstellern getrennt dargestellt.

An Hand der Diagramme war bei den untersuchten Film-Folien-Kombinationen kein einfach zu beschreibender Zusammenhang zwischen der Röhrenspannung, dem FFA und der mittleren Standardabweichung festzustellen.

Dies läßt den Schluß zu, daß das Quantenrauschen bei den Untersuchungen entweder nicht aufgetreten ist oder mit dem beschriebenen Verfahren nicht gemessen werden konnte, da ansonsten zumindest bei höchstverstärkenden Kombinationen ein Anstieg der σ -Werte mit wachsender Röhrenspannung zu erwarten gewesen wäre.

Wie bereits in Abschn. 3.5.1.4. beschrieben, ist jedoch in Abb. 41 eine Tendenz zu höheren σ -Werten bei 70 kV und 102 kV Röhrenspannung zu erkennen, die möglicherweise zu

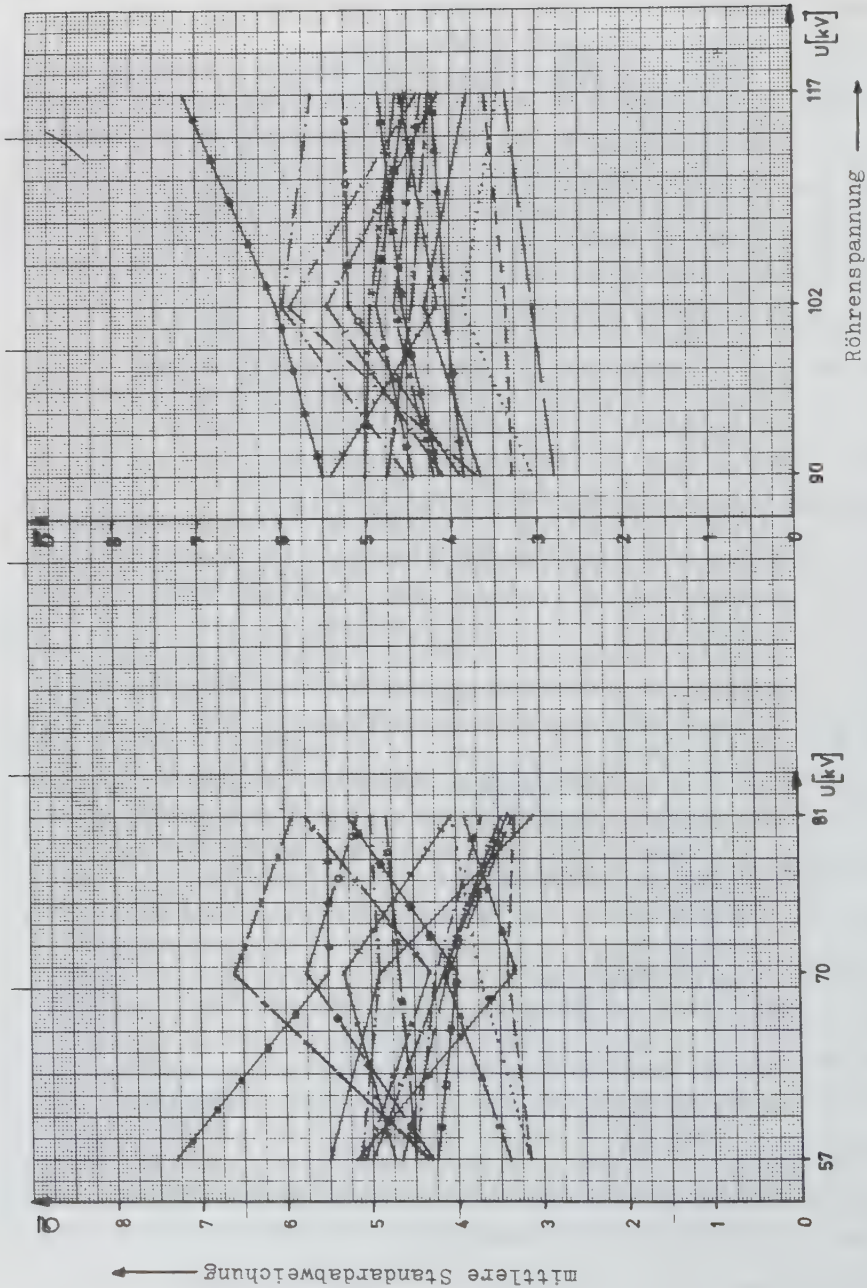


Abb. 40 Die Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung von der verwendeten Röhrenspannung für die Film-Folien-Kombinationen A, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L, N, O, P, Q, R

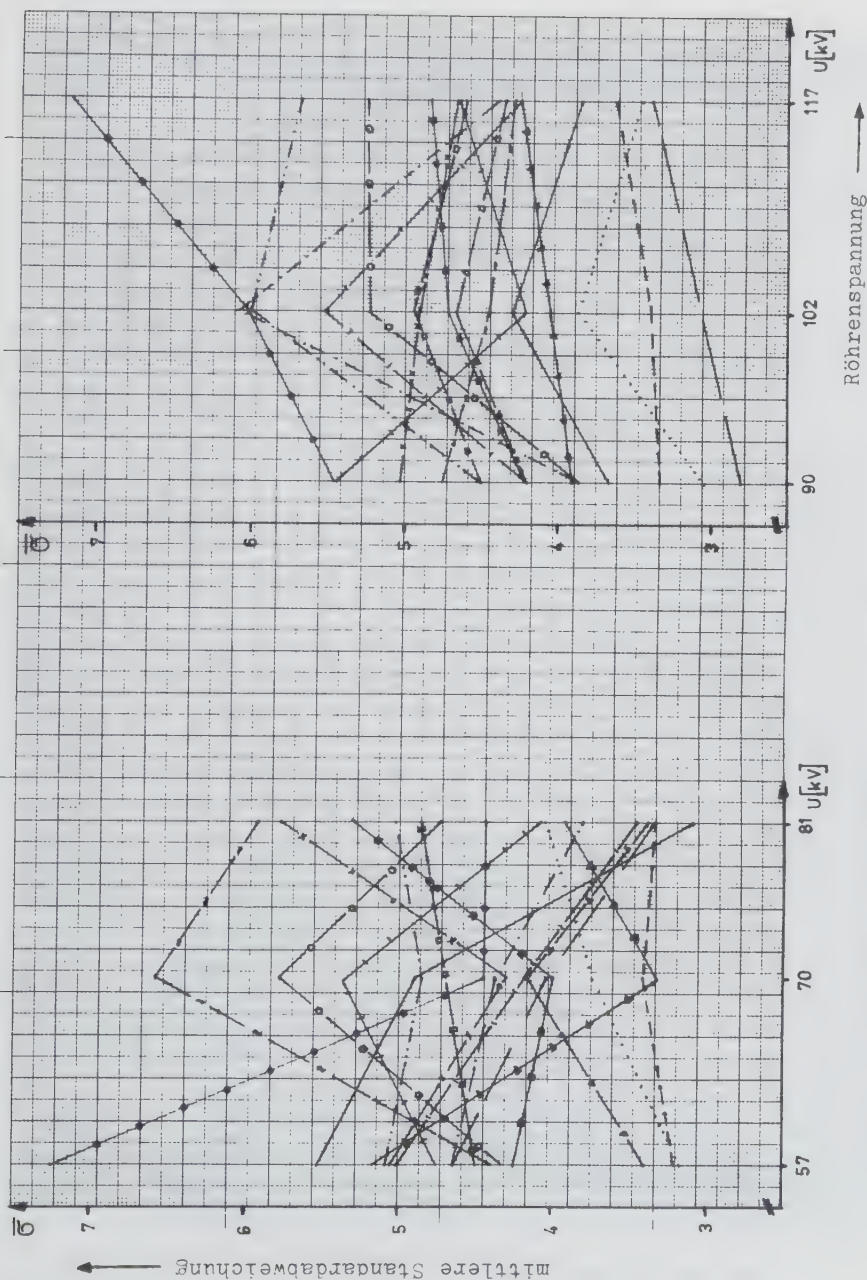


Abb. 41 Die Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung von der verwendeten Röhrenspannung für die Film-Folien-Kombinationen A, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L, N, O, P, Q, R

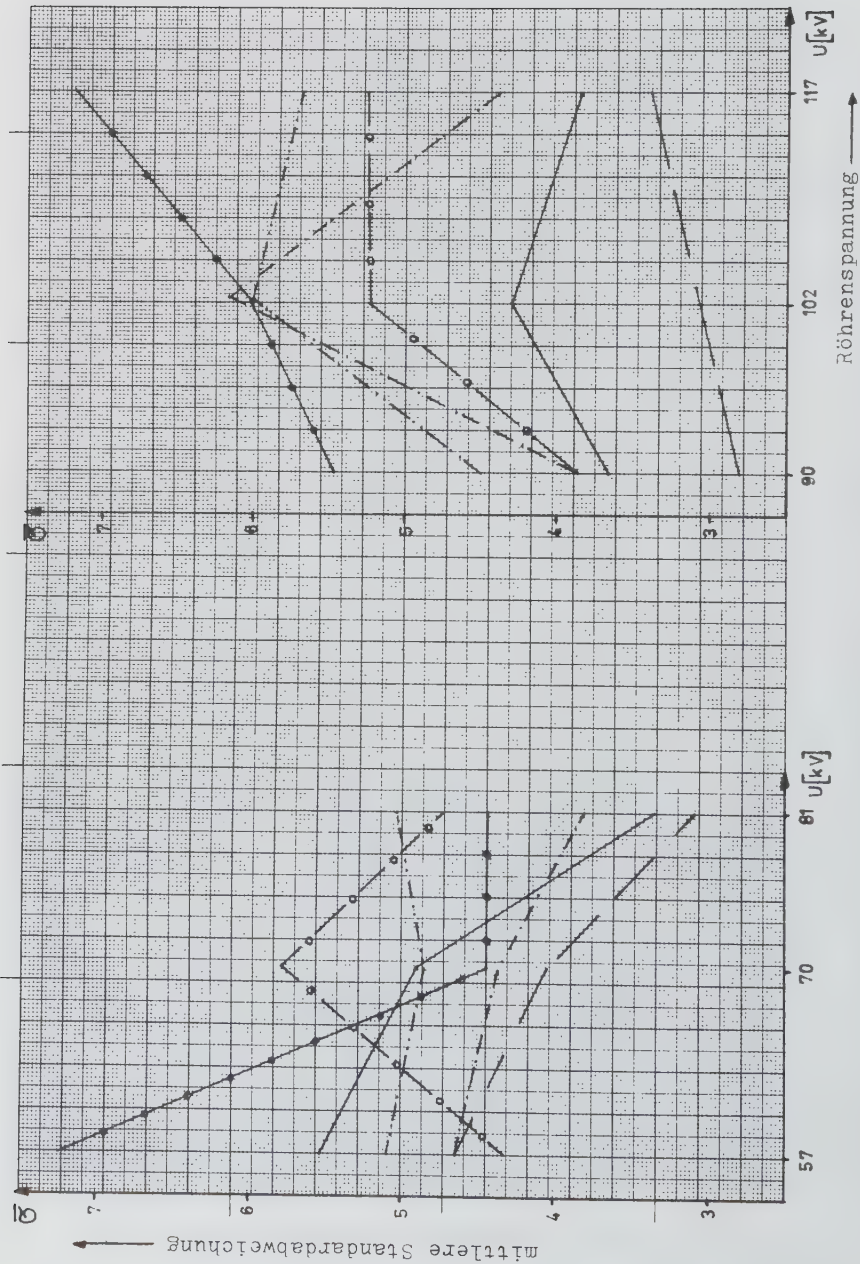


Abb. 42 Die Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung von der verwendeten Röhrenspannungen für die Film-Folien-Kombinationen der Fa. Siemens A, B, C, H, I, K

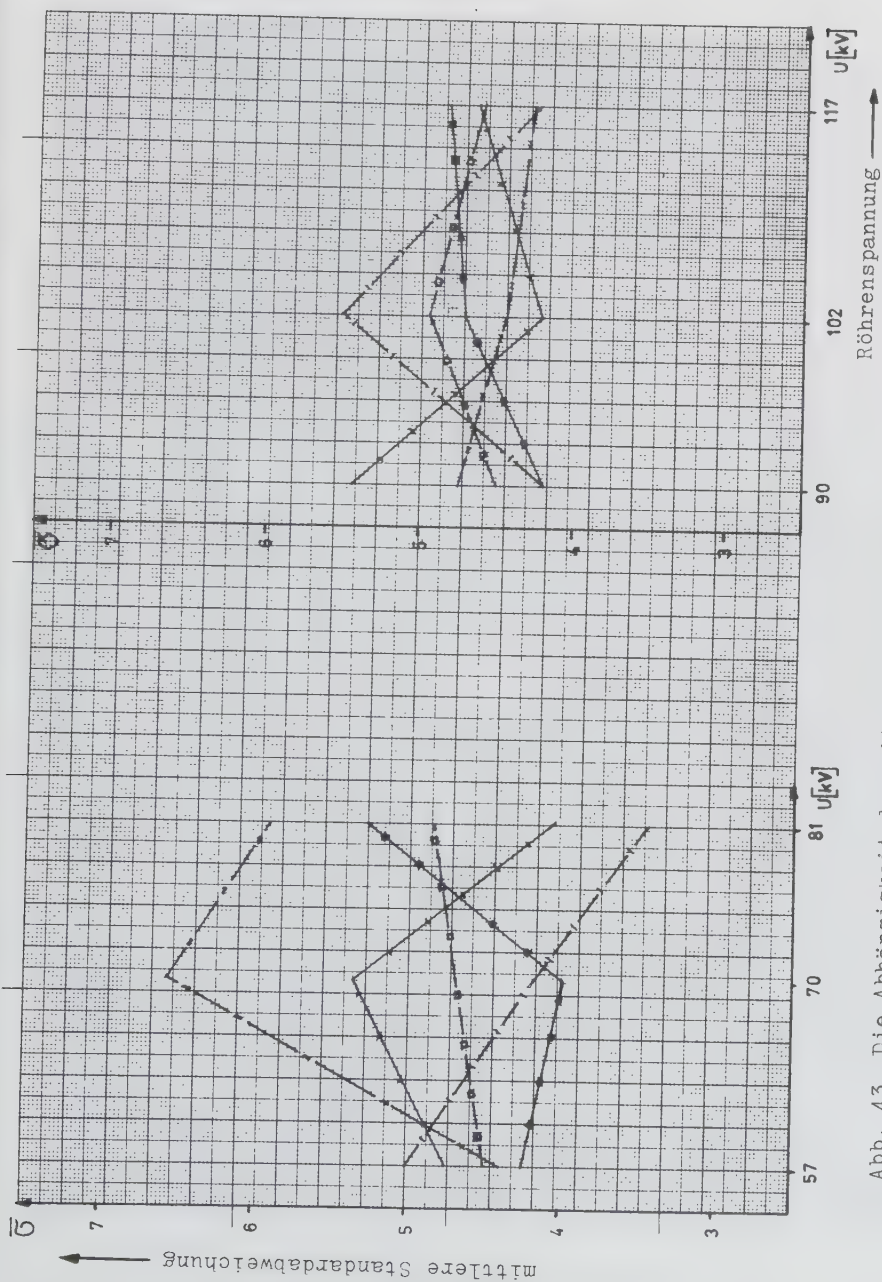


Abb. 43 Die Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung von der verwendeten Röhrenspannung für die Film-Folien-Kombinationen des 3M Trimax-Systems N, O, P, Q, R

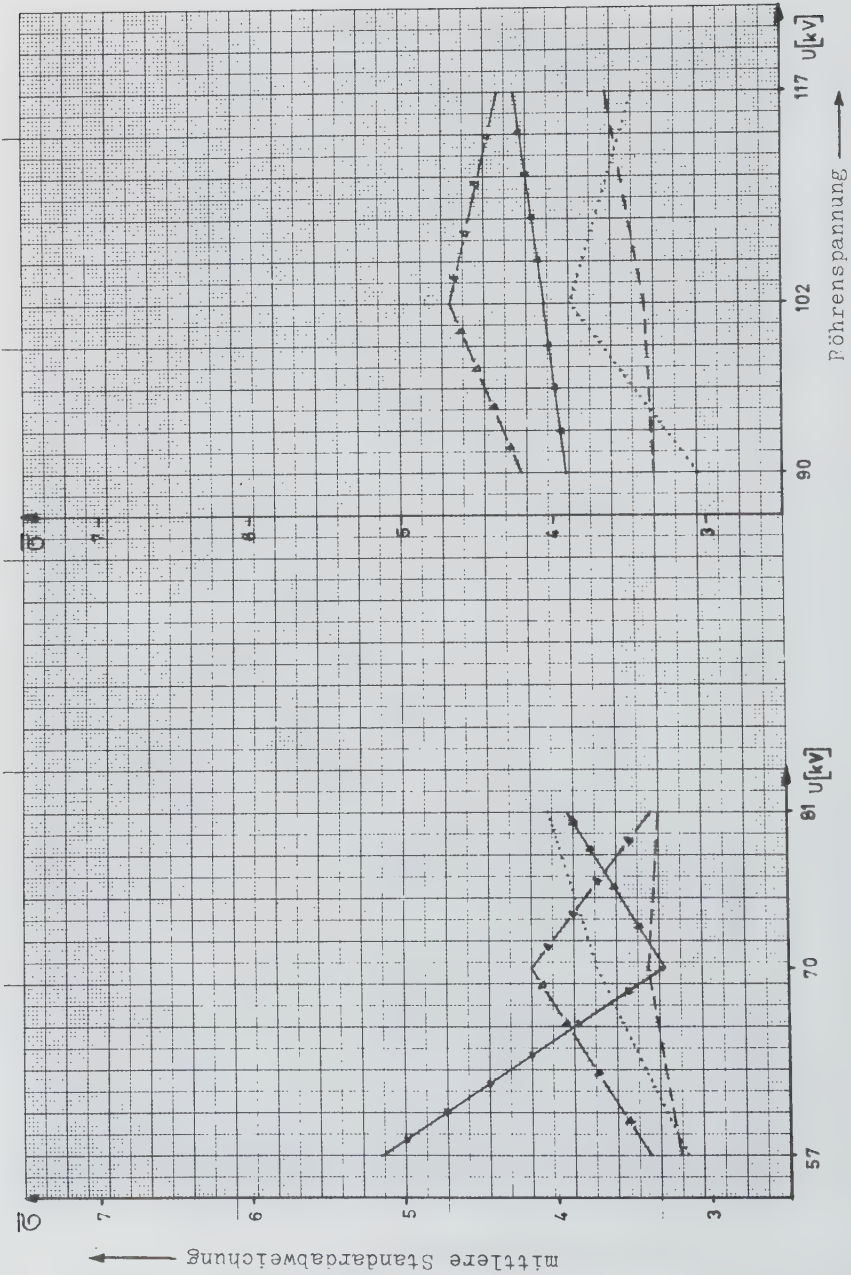


Abb. 44 Die Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung von der verwendeten Röhrenspannung für die Film-Folien-Kombinationen der Fa. CAWO, Schrobenhausen D, E, F, G

einer Abnahme des Auflösungsvermögens bei diesen Aufnahmespannungen führten.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die in der vorliegenden Arbeit berechnete Standardabweichung in keiner gerichteten Beziehung zur Röhrenspannung, zur Brennfleckgröße und zum FFA steht, unter Umständen aber einen Einfluß auf das Auflösungsvermögen besitzt.

Dies würde bedeuten, daß es sich bei dem untersuchten Rauschen um eine Materialeigenschaft der Film-Folien-Kombinationen handelt.

Unter der Voraussetzung, daß σ nicht von der Röhrenspannung und vom FFA abhängig ist, erfolgte zur Verbesserung der statistischen Aussagekraft für jede Film-Folien-Kombination eine Zusammenfassung der σ -Werte, die bei unterschiedlichen Aufnahmespannungen und unterschiedlichem FFA gewonnen worden waren.

Diese Mittelwerte der mittleren Standardabweichung wurden in Abb. 45 dem Auflösungsvermögen der einzelnen Film-Folien-Kombinationen gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wurde auch das Auflösungsvermögen über die bei sechs verschiedenen Aufnahmespannungen gewonnenen Werte gemittelt.

Unter der Voraussetzung, daß die mittlere Standardabweichung ein geeignetes Maß für das Rauschen ist, sollte nach Lissner (35) das Auflösungsvermögen, d.h. die Erkennbarkeit kleiner Details umso größer sein, je kleiner der Durchschnittswert der mittleren Standardabweichung ist.

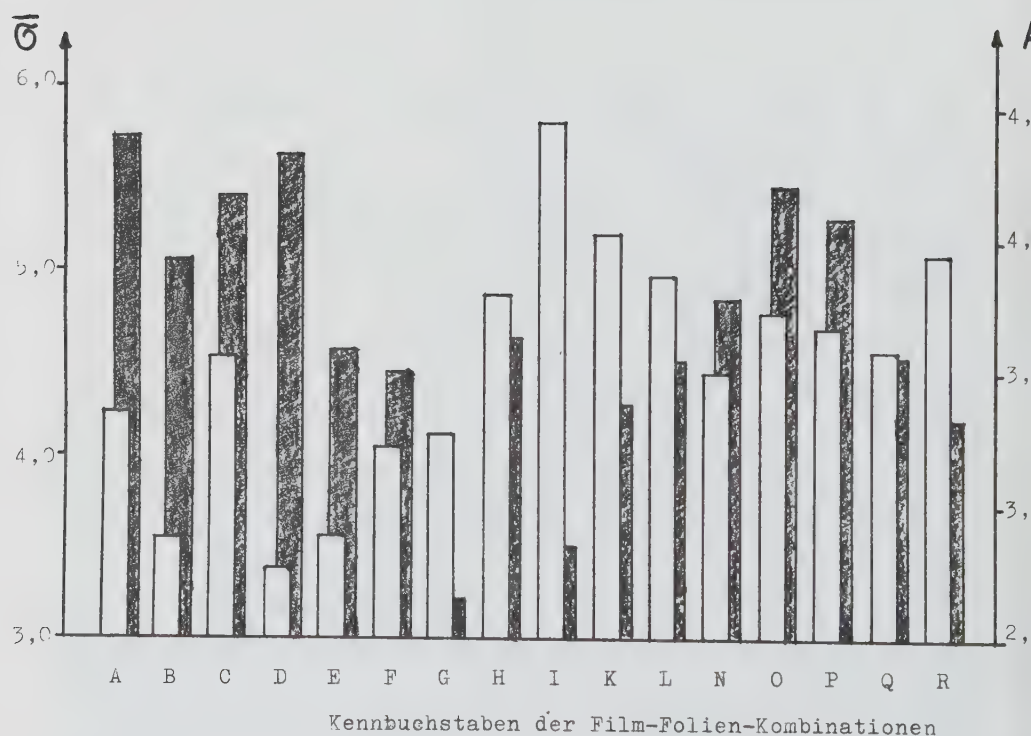


Abb. 45 Vergleich der mittleren Standardabweichung mit dem Auflösungsvermögen der einzelnen Film-Folien-Kombinationen. (Die Durchschnittswerte der mittleren Standardabweichung sind als helle Balken dargestellt, die Durchschnittswerte des Auflösungsvermögens als dunkle Balken.)

Betrachtet man z.B. die Kombinationen D, E, F und G der Fa. CAWO, so ist aus der Abb. 45 deutlich zu erkennen, daß das Auflösungsvermögen mit ansteigender mittlerer Standardabweichung abnimmt.

Die SE-Film-Folien-Kombinationen der Fa. Siemens H, I und K weisen deutlich höhere $\bar{\sigma}$ -Werte auf als die CaWO_4 -Kombinationen A, B und C des gleichen Herstellers. Die Kombinationen H, I und K zeigen dementsprechend ein geringeres Auflösungsvermögen als die Kombinationen A, B und C.

Die Abb. 45 zeigt jedoch weiter, daß keine eindeutige Beziehung besteht zwischen mittlerer Standardabweichung und Auflösungsvermögen. Dies ist sowohl an den CaWO_4 -Kombinationen A und C, als auch an den SE-Kombinationen N, O und P zu erkennen, bei denen ein durchschnittlicher $\bar{\sigma}$ -Wert mit relativ hohem Auflösungsvermögen verbunden ist.

Möglicherweise ist beim CaWO_4 und bei grün-leuchtenden SE-Folien ein nach diesem Verfahren bestimmtes hohes Rauschen mit relativ hohem Auflösungsvermögen vereinbar, nicht dagegen bei blau-leuchtenden SE-Folien.

Der niedrigste durchschnittliche $\bar{\sigma}$ -Wert wurde mit der SE-Kombination D erreicht, die das zweithöchste Auflösungsvermögen zeigte. Der höchste $\bar{\sigma}$ -Wert wurde für die SE-Kombination I errechnet, die auf Grund ihrer hochverstärkenden Eigenschaften bei der Auswertung des Auflösungstests den zweitniedrigsten Wert erreichte.

Zusammenfassend läßt sich folgendes sagen:
Das mit dem beschriebenen Verfahren gemessene Rauschen läßt keine direkten Rückschlüsse auf das mit der jeweiligen Film-Folien-Kombination erreichbare Auflösungsvermögen zu.

Es ist zwar die Tendenz zu erkennen, daß geringeres Rauschen einen positiven Einfluß auf die Detailerkennbarkeit hat, jedoch schließt ein mit diesem Verfahren gemessenes "starkes" Rauschen ein hohes Auflösungsvermögen nicht aus. Das bedeutet auch, daß Film-Folien-Kombinationen mit geringem Dosisbedarf nicht unbedingt ein hohes Maß an Rauschen aufweisen müssen, was bereits mit bloßem Auge beobachtet werden kann.

Abb. 46 gibt den Zusammenhang zwischen dem mAs-Bedarf und der mittleren Standardabweichung für verschiedene Film-Folien-Kombinationen wieder. Die dargestellten Werte des mAs-Produkts und der mittleren Standardabweichung geben den Durchschnitt der bei sechs verschiedenen Röhrenspannungen gewonnenen Meßwerte wieder.

Betrachtet man in Abb. 46 die Film-Folien-Kombinationen jedes Herstellers für sich als Gruppe, so läßt sich feststellen, daß der $\bar{\sigma}$ -Wert mit fallendem mAs-Produkt, d.h. mit fallendem Dosisbedarf ansteigt. Die Kombinationen D, E, F und G der Fa. CAWO lassen dies deutlich erkennen. Lediglich die Kombinationen B, K und O in Abb. 46 bilden in dieser Hinsicht aus unbekannten Gründen eine Ausnahme. Für die Komb. B und K wäre auf Grund ihres Dosisbedarfs ein höherer $\bar{\sigma}$ -Wert zu erwarten, für die Komb. O dagegen ein niedrigerer.

Eine Erklärung dafür, daß die Komb. B der Fa. Siemens und die Komb. D, E, F und G der Fa. CAWO verglichen mit den übrigen Kombinationen ein wesentlich geringeres Rauschen aufwiesen, als ihrem mAs-Bedarf entsprochen hätte, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht gefunden werden.

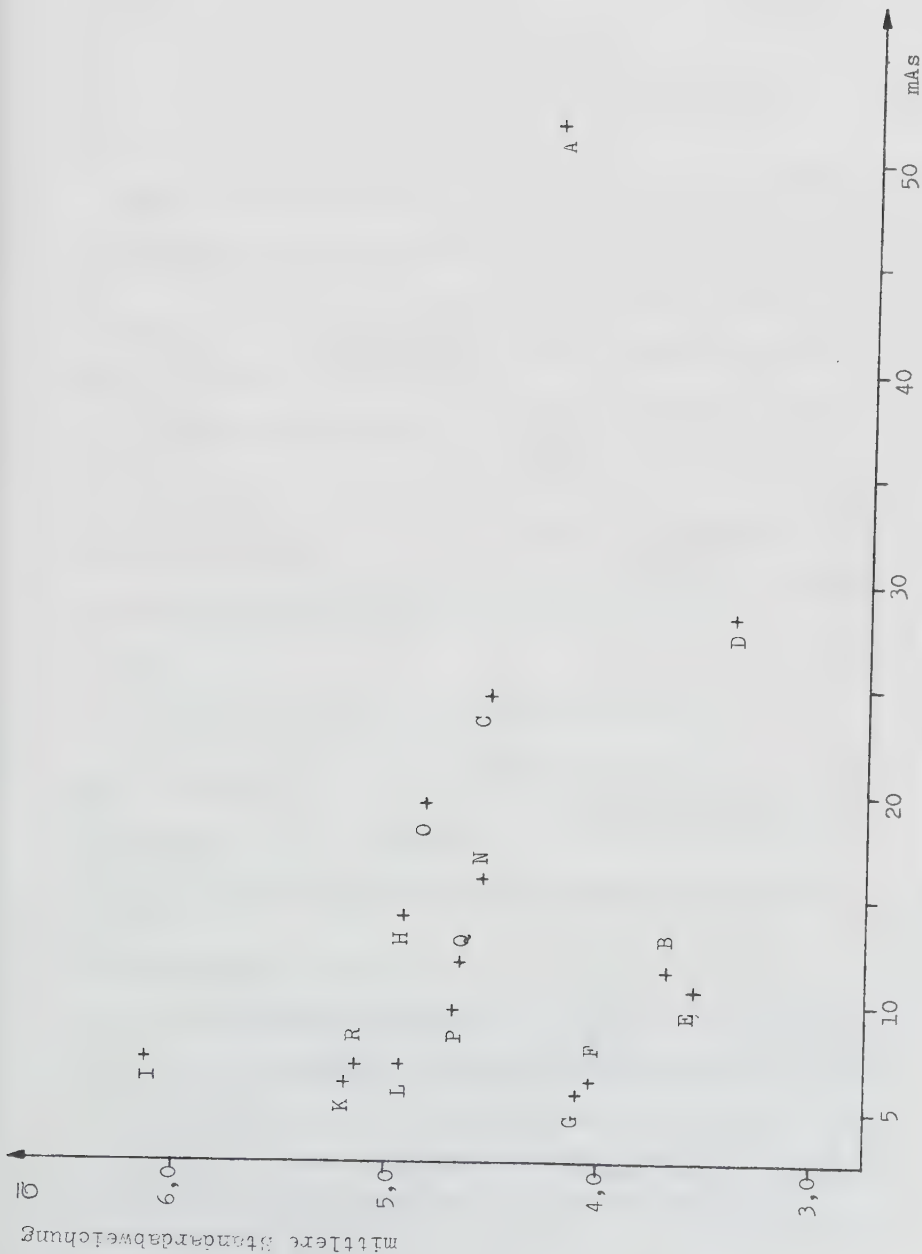


Abb. 46 Abhängigkeit der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}$ vom mAs-Bedarf der untersuchten Film-Folien-Kombinationen

4. Diskussion

4.1. Ziel der Untersuchung

Da Röntgenverstärkerfolien in hohem Maß zur Minderung der Strahlenbelastung beitragen können, ist die Kenntnis ihrer Eigenschaften unabdingbare Voraussetzung für ihre richtige Anwendung.

Das Ziel dieser Arbeit war es, einige physikalische Eigenschaften verschiedener Röntgenverstärkerfolien unter möglichst praxisnahen Bedingungen zu untersuchen und zu beschreiben.

Die Beschreibung der chemischen und der physikalisch-chemischen Eigenschaften wie, z.B. die Kristalldaten der Leuchtstoffe, wurde aus der entsprechenden Literatur übernommen.

Die mechanische Belastbarkeit und die Haltbarkeit der Verstärkerfolien konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden.

4.2. Röntgenbilderzeugung mit Hilfe von Film-Folien-Systemen

Das Ziel jeder Röntgenuntersuchung ist die Umwandlung von Objektdetails in Schwärzungsunterschiede im Bild.

Die Röntgenbilderzeugung mit Hilfe von Röntgenfilm-Verstärkerfolien-Kombinationen ist nach wie vor eines der am häufigsten angewandten Diagnostikverfahren neben Schirmbildphotographie, Bildverstärkerphotographie und

Computertomographie.

Die Industrie bot in letzter Zeit als Ergänzung auf diesem Gebiet neue Erzeugnisse an. Es handelt sich um die Verstärkerfolien auf der Basis der seltenen Erden und speziell auf diese Folien abgestimmte Filme.

Zum besseren Verständnis der Untersuchungen wurde zunächst die Entstehung einer Röntgenaufnahme mit Hilfe eines Film-Folien-Systems beschrieben. Besonders berücksichtigt wurde dabei die Röntgengerätetechnik, die Strahlungseigenschaften und die Abbildungsgeometrie.

Da jedoch die Bildqualität einer Röntgenaufnahme in technischer Hinsicht wesentlich durch die Wahl der geeigneten Film-Folien-Kombination bestimmt wird, wurde besonders auf die Eigenschaften und den Aufbau von Röntgenfilm und Verstärkerfolie eingegangen.

4.3. Eigenschaften der Verstärkerfolien

Alle Eigenschaften der Verstärkerfolien werden durch das Zusammenwirken ihrer Bestandteile bestimmt. So nützt beispielsweise eine höhere Belegungsichte der Folie mit Leuchtkristallen nichts in Bezug auf eine erwünschte Verminderung des Dosisbedarfs, wenn man gleichzeitig das Bindemittel, die Reflexionsschicht und die Schutzschicht dunkel einfärbt und dadurch die mögliche Dosisreduzierung wieder verhindert.

Erst das Erkennen und die Nutzung der positiven Eigenschaften aller Bestandteile einer Folie führt zu den

gewünschten Abbildungseigenschaften. Das gleiche gilt auch für die Verbindung zwischen Film und Verstärkerfolie. So sind die Vorteile der grün-leuchtenden Verstärkerfolien, wie ihr geringer Dosisbedarf, nur mit speziell für diese Folien entwickelten Filmen nutzbar. Werden diese Folien mit den herkömmlichen blau-empfindlichen Filmen angewandt, so können nicht nur die Vorteile der grün-leuchtenden Verstärkerfolien verloren gehen, sondern es kann auch eine Minderung der Bildqualität und eine Erhöhung des Dosisbedarfs eintreten.

Die Eigenschaften der Einzelbestandteile der Filme und Folien werden nur soweit beschrieben, wie ihre Kenntnis notwendig ist für die Gesamteigenschaften einer Folie bzw. eines Films.

4.4. Ursachen der Unschärfe

Die Unschärfe wirkt sich negativ auf die Erkennbarkeit der Details des Aufnahmeobjekts im Röntgenbild aus.

Nach der Vorstellung vieler Autoren (30, 45, 46) setzt sich die Unschärfe im Röntgenbild aus der Bewegungsunschärfe, der geometrischen Unschärfe und der Materialunschärfe der Film-Folien-Kombination zusammen. Einige Autoren weisen darauf hin, daß mit stark abnehmendem Dosisbedarf der Bildaufzeichnungssysteme die Materialunschärfe durch das Quantenrauschen verstärkt wird (15, 16, 29, 35).

Während in dieser Arbeit nicht auf die Bewegungsunschärfe eingegangen wird, sind die geometrische Unschärfe und die Materialunschärfe soweit Gegenstand dieser Untersuchung,

als sie durch die Messung des Auflösungsvermögens beschrieben werden können.

Da auch das Rauschen einen Einfluß auf die Bildqualität hat, wurde auch dieses Phänomen untersucht.

4.5. Verfahren der Qualitätsbeurteilung von Abbildungssystemen

Es werden drei grundsätzliche Verfahren zur Qualitätsbeurteilung bzw. zum Vergleich der Eigenschaften von Abbildungssystemen beschrieben. Es handelt sich um das subjektive, das halbobjektive, sowie um das objektive Verfahren.

Das subjektive Verfahren des Qualitätsvergleichs schied von vornherein aus, da die zur Auswertung der Aufnahmen notwendige große Anzahl von Radiologen nicht zur Verfügung stand und außerdem das Phantom der Deutschen Röntgen-Gesellschaft zum Einsatz kommen sollte (siehe Definition des subjektiven Verfahrens in Abschn. 2.4.2.). Aus diesem Grund kamen nur halbobjektive und objektive Verfahren zur Anwendung.

Die Auswertung des Auflösungstests ist unter die halbobjektiven Verfahren einzuordnen, während die den Schwärzungskurven zugrundeliegenden Messungen und die Untersuchung des Rauschens mit Mikrodensitometer und Rechner als objektive Verfahren gelten dürfen.

Da die Untersuchungen möglichst einfach durchführbar sein sollten, wurde auf Verfahren wie beispielsweise die Durchführung einer Fourieranalyse verzichtet.

4.6. Methode der Film-Folien-Untersuchung

4.6.1. Untersuchungsanordnung

Während manche Autoren (6, 22) die Verstärkungswirkung der Folien durch die Messung des direkt von der Folie emittierten sichtbaren Lichts mittels Photomultiplier untersuchten, haben wir in Anlehnung an Freyschmidt u. Mitarb. (19), sowie auch Hagemann u. Mitarb. (24) die Auswirkungen des von den Folien emittierten Lichts auf die Filmschwärzung untersucht.

Die Abbildungsgeometrie und die Röntgeneinrichtung wurden gegenüber dem täglichen klinischen Routinebetrieb nicht verändert. Ebenso wurde, wie zum Zeitpunkt der Untersuchungsdurchführung auch im klinischen Routinebetrieb, bei hohen Röhrenspannungen mit größerem FFA gearbeitet als bei niedrigen Aufnahmespannungen.

4.6.2. Untersuchungsdurchführung

Um Aussagen über das Verhalten der verschiedenen Film-Folien-Kombinationen machen zu können, wurden einige Aufnahmedaten variiert. Es handelt sich um die Röhrenspannung, die Brennfleckgröße der Röntgenröhre und den Film-Fokus-Abstand.

Diese Daten wurden auf einen Bereich eingestellt, der auch am Patienten Verwendung findet.

Unberücksichtigt blieb bei den Untersuchungen der Einfluß der Verwendung zweier verschiedener Röntgenröhren (Tisch-

stativ und Wandstativ). Denkbar wäre in diesem Zusammenhang eine unterschiedliche Strahlungsabgabe der beiden Röhren, da im Routinebetrieb am Tischgerät ca. fünfmal so viele Aufnahmen angefertigt wurden wie am Wandstativ (Alterung der Röhren)(56).

4.7. Ergebnisse der Messungen, die bei der Belichtung der Filme durchgeführt wurden

Bei der Messung des mAs-Produkts zeigte das Generatorschaltpult um durchschnittlich 10 % niedrigere Werte an als ein direkt am Generator angeschlossenes Meßgerät. Die Ursache für diese Differenz konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden. Sollten Abweichungen dieser Art bei verschiedenen Röntgenanlagen jedoch in unterschiedlicher Ausprägung auftreten, so würde dies die Vergleichbarkeit von Meßreihen, die an verschiedenen Geräten durchgeführt wurden, einschränken.

Für alle untersuchten Film-Folien-Kombinationen gilt im untersuchten Bereich von 57 bis 117 kV, daß das zu einer vergleichbaren Filmschwärzung notwendige mAs-Produkt mit zunehmender Röhrenspannung abnimmt. Diese von Freyschmidt und Mitarb. (19) als Spannungsgang bezeichnete Eigenschaft ist umso ausgeprägter, je höher der Dosisbedarf einer Kombination ist. Ein wesentlicher Unterschied im Spannungsgang war zwischen CaWO₄- und SE-Kombinationen innerhalb der Fehlergrenzen der Meßanordnung nicht zu erkennen.

Mit den höchstverstärkenden SE-Kombinationen wurde die untere Grenze der Schaltzeiten der verwendeten Röntgeneratoren erreicht. Auf dieses Problem wird auch in der Literatur wiederholt hingewiesen (18, 28, 65).

Als Lösungen bieten sich die Anwendung schnellerer elektronischer Schaltungen an oder einfacher die Vergrößerung des FFA und stärkere Filterung (19, 29).

Für die Messung der Eintrittsdosis am Phantom wäre zu erwarten gewesen, daß die Werte entsprechend dem ermittelten mAs-Produkt für alle Kombinationen mit steigender Aufnahmespannung stetig abfallen. Die Dosis müßte sich zum mAs-Produkt und zum Flächendosisprodukt direkt proportional verhalten. Die aus Abb. 23 ersichtlichen Abweichungen einiger Film-Folien-Kombinationen von dieser Gesetzmäßigkeit sind nur durch Fehler bei der Ablesung oder beim Gebrauch des verwendeten Dosimeters zu erklären, da diese Abweichungen andernfalls auch bei der Messung des Flächendosisprodukts zu erwarten gewesen wären. Beim Flächendosisprodukt ergab sich jedoch für alle Kombinationen eine ähnliche Spannungsabhängigkeit wie bei der Messung des mAs-Produkts, nämlich stetig fallende Werte bei ansteigender Röhrenspannung. Auf Grund der bei der Dosismessung aufgetretenen Fehler wurde zum Vergleich der verschiedenen Film-Folien-Kombinationen das gemessene mAs-Produkt herangezogen (Tab. 10), das ein direktes Maß für den Dosisbedarf darstellt.

Für die Praxis erscheint es nicht sinnvoll, Systeme mit unterschiedlichem Auflösungsvermögen zu vergleichen, da z.B. höchstverstärkende Kombinationen in anderen Anwendungs-

gebieten eingesetzt werden als feinzeichnende Kombinationen. Um einen Vergleich zu ermöglichen, war es deshalb erforderlich, die Film-Folien-Kombinationen bezüglich ihres Auflösungsvermögens zu ordnen.

4.8. Ergebnis des Auflösungstests

Zu diesem Zweck wurde der im Phantom der DRG eingebaute Auflösungstest ausgewertet. Da dieser eine maximale Auflösung von 5 LP/mm erkennen läßt, konnten auch für die feinzeichnenden Kombinationen keine höheren Werte ermittelt werden.

Insbesondere mit den für Laborzwecke hergestellten Folien erreicht man nach Angaben in der Literatur heute bereits Auflösungswerte von mehr als 10 LP/mm (12). Allerdings weisen diese Folien derzeit noch eine stark verminderte Haltbarkeit auf (12).

Die Auswertung der angefertigten Aufnahmen ergab, daß bei hoher Röhrenspannung und großem FFA von allen Film-Folien-Kombinationen höhere Auflösungswerte erreicht wurden als bei niedrigen Aufnahmespannungen und kleinem FFA. Da Freyschmidt (19) beschreibt, daß mit ansteigender Röhrenspannung kleine Details weniger gut zu erkennen sind, muß das vorliegende Ergebnis auf die Veränderung des Fokus-Film-Abstandes zurückzuführen sein. Dies bedeutet, daß das von Freyschmidt beobachtete Absinken des Auflösungsvermögens bei hohen Röhrenspannungen durch eine Vergrößerung des FFA mehr als ausgeglichen werden kann. Für diesen Sachverhalt

spricht auch, daß das maximal erkennbare Auflösungsvermögen von 5 LP/mm nur bei hoher Röhrenspannung und großem FFA erreicht wurde, und zwar sowohl mit CaWO_4 - als auch mit SE-Kombinationen. Ursache hierfür ist die verminderte geometrische Unschärfe bei Vergrößerung des FFA.

Die verminderte geometrische Unschärfe wirkt sich auch bei einer Verkleinerung des Röhrenbrennflecks positiv auf das Auflösungsvermögen aus. Bei gleichem FFA und gleicher Röhrenspannung steigerte sich das Auflösungsvermögen durch Verkleinerung des Röhrenbrennflecks von $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ auf $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$, d.h. auf ein Viertel der ursprünglichen Größe, um etwa 30 % (siehe dazu Tab. 9).

In Abb. 26 fällt auf, daß für viele Kombinationen gilt, daß das Auflösungsvermögen bei 70 kV geringer war als bei 57 und 81 kV. Da der genannte Effekt sowohl bei CaWO_4 - als auch bei SE-Kombinationen auftritt, dürfte die Ursache dafür in der gewählten Versuchsanordnung liegen:

Es wäre denkbar, daß das Plexiglas, aus dem das Phantom hergestellt ist, bei einer Röhrenspannung von 70 kV die Strahlung stärker aufhärtet, was nach Freyschmidt (19) zu einer Herabsetzung des Auflösungsvermögens führt.

Die Abb. 47 zeigt eine Gegenüberstellung des zu einer vergleichbaren Filmschwärzung erforderlichen mAs-Produkts und des im entwickelten Film gemessenen Auflösungsvermögens. Das Diagramm enthält sowohl für das Auflösungsvermögen als auch für das mAs-Produkt die Mittelwerte aus den bei sechs unterschiedlichen Röhrenspannungen gewonnenen Meßwerten (Tab. 4 und Tab. 8).

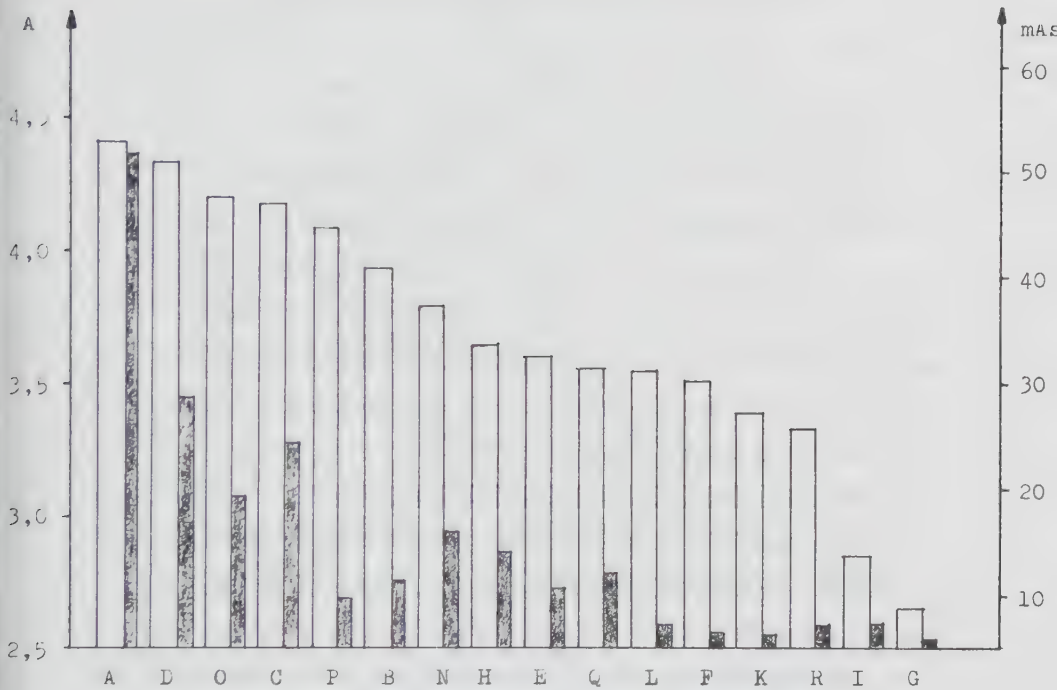


Abb. 47 Vergleich des Auflösungsvermögens A [LP/mm] (dargestellt als heller Balken) mit dem mAs-Bedarf für eine vergleichbare Filmschwärzung (dargestellt als dunkler Balken)

Unabhängig davon, welches Film-Folien-System benutzt wird, gilt zur Zeit weiterhin, daß mit steigendem Auflösungsvermögen der mAs-Bedarf und damit der Dosisbedarf zunimmt, wenn man jedes System für sich allein betrachtet.

Vergleicht man die Systeme untereinander, so wird deutlich, daß die SE-Systeme gegenüber den konventionellen CaWO_4^-

Systemen vergleichbare Auflösungswerte mit geringerem Dosisbedarf erreichen. Eine allgemein gültige Richtzahl läßt sich für diese Dosisminderung jedoch nicht angeben, da die Reduzierung von der erreichbaren Auflösungsfähigkeit abhängig ist. Vergleicht man beispielsweise die feinzeichnende CaWO_4 -Komb. A mit der feinzeichnenden SE-Komb. D, so ergibt sich eine Reduzierung des mAs-Produkts um 45 %. Gegenüber den Kombinationen A und D besitzen die beiden Kombinationen C (CaWO_4) und O (SE) ein niedrigeres Auflösungsvermögen. Die Reduzierung des mAs-Produkts mit Hilfe der SE-Komb. beträgt in diesem Fall "nur" 20 %.

Die starke Schwankungsbreite der in der Literatur angegebenen möglichen Dosisreduzierung durch Verwendung von SE-Film-Folien-Kombinationen ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- Unterschiedliche Versuchsanordnungen (Strahlenhärte!)
- Unterschiedliche Definitionen von "Bildqualität"
- Vergleich von Systemen mit unterschiedlicher Bildqualität.

Vor allem auf den letztgenannten Faktor dürften die Ergebnisse von Autoren zurückzuführen sein, die Dosisminderungen von 95 % (10), 90 % (49) und 75 % (16, 29, 58) durch die Verwendung von SE-Kombinationen für erreichbar halten.

Diese Werte sind jedoch nach der vorliegenden Untersuchung nur dann erreichbar, wenn man Systeme mit sehr unterschiedlichem Auflösungsvermögen vergleicht, wie z.B. die CaWO_4 -Komb. A (feinzeichnend) mit der SE-Komb. G (hochverstärkend). Für das genannte Beispiel ergibt sich eine Reduzierung des

mAs-Produkts um 90 %, die jedoch mit einer Abnahme des Auflösungsvermögens um 40 % verbunden ist.

Für die Praxis erscheint es jedoch realistisch, nur Systeme mit annähernd gleichem Auflösungsvermögen zu vergleichen. Die für diesen Fall gefundenen Werte von bis zu 45 % Dosisreduzierung decken sich annähernd mit dem in der Literatur angegebenen Wert von 50 % (63, 65).

Ein wesentlicher Unterschied zwischen grün-leuchtenden Folien einerseits und blau-leuchtenden Folien andererseits war nicht festzustellen.

Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, daß mit der CaWO_4 -Kombination B bei geringerem mAs-Bedarf höhere Auflösungs-
werte erreicht wurden als mit den SE-Kombinationen H, N und Q. Wie Degenhardt berichtet, stellt die Siemens-Spezial-Folie, die in der Kombination B enthalten ist, allerdings die "Grenze des mit CaWO_4 Machbaren dar", da sie eine hohe Schichtdicke mit sehr geringem Bindemittelanteil aufweist (14). Die SE-Komb. P zeigt, daß diese "Grenze" mit SE-Leuchtstoffen überschritten werden kann: Sie verbindet höheres Auflösungsvermögen mit geringerem mAs-Bedarf als Komb. B .

Zusammenfassend läßt sich zur Frage des Dosisbedarfs feststellen, daß sowohl mit grün- als auch mit blau-leuchtenden SE-Verstärkerfolien gegenüber dem Kalziumwolframat eine Dosisreduzierung bei gleichbleibendem Auflösungsvermögen oder umgekehrt eine Steigerung des Auflösungsvermögens bei gleichem Dosisbedarf möglich ist.

4.9. Ergebnis der Kontrastuntersuchungen am Aluminium-Keil

Aus der Praxis ist bekannt, daß Wirbelsäulenaufnahmen mit SE-Folien einen höheren Kontrastumfang aufweisen können als bei Verwendung von CaWO_4 -Folien. In Abhängigkeit vom Ausmaß skoliotischer und kyphotischer Veränderungen kann dies dazu führen, daß auf den Röntgenbildern nur einzelne Wirbelkörper diagnostisch beurteilbar sind, die übrige Wirbelsäule aber über- oder unterbelichtet abgebildet ist.

Um der Frage nachzugehen, ob eine inhomogene Strahlenhärte zu einer unterschiedlichen Lichtausbeute der Folien und damit zu einer unterschiedlichen Filmschwärzung führt, haben wir die Filmschwärzung nach Aufbelichtung eines Aluminium-Keils von 3 - 39 mm Materialstärke bei verschiedenen Film-Folien-Kombinationen gemessen (siehe Kap. 3.5.1.5.).

Es konnte bestätigt werden, daß die gewonnenen Schwärzungskurven umso flacher verlaufen, je höher die verwendete Röhrenspannung ist (35). Dies gilt jedoch nur in einem mittleren Filterstärkenbereich. In Bereichen sehr starker oder sehr schwacher Filterung ist das Verhältnis umgekehrt, d.h. die Kontraste steigen mit zunehmender Röhrenspannung. Da der Gesamt-Kontrastumfang der Aufnahmen jedoch gleich bleibt, folgt daraus, daß die vorliegenden Schwärzungskurven (Abb. 27 - 29) umso gleichmäßiger ansteigen, je höher die Aufnahmespannung ist.

Bei den Untersuchungen am Aluminium-Keil wurde als Ergebnis festgestellt: Je höher die Röhrenspannung ist, umso weniger ist die Kontrastwiedergabe der verschiedenen

Film-Folien-Systeme von der absoluten Filterstärke des Aluminium-Keils abhängig.

Bei niedrigen Aufnahmespannungen sinkt der Kontrast in Bereichen hoher bzw. niedriger absoluter Filterstärke, während er im Bereich mittlerer Filterstärke ansteigt.

Inwieweit sich dieses Ergebnis auf die Praxis übertragen läßt, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, da sich zwischen der Filterwirkung von Aluminium und der Filterwirkung von biologischem Material keine einfach zu beschreibende Beziehung herstellen läßt.

Hierin dürfte auch die Ursache dafür liegen, daß ein wesentlicher Unterschied im Verlauf der Schwärzungskurven zwischen SE- und CaWO_4 -Kombinationen im Rahmen der Meßgenauigkeit dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden konnte. Unter Umständen ist aber auch der verwendete Aluminium-Keil in Bezug auf Materialstärke und Abstufung kein geeignetes Modell für die Filterwirkung eines menschlichen Thorax und einer menschlichen Wirbelsäule.

Als Gründe für das in der Praxis möglicherweise auftretende unterschiedliche Kontrastverhalten der SE-Folien kommen in Betracht:

1. Unterschiedliche Abhängigkeit der Empfindlichkeit der Leuchtstoffe von der Strahlenenergie.
2. Abweichungen der Strahlenenergie vom eingestellten Wert, die durch Röntgengerätetechnik und Aufnahmeobjekte bedingt sind.

zu 1. : Es ist bekannt, daß alle Leuchtstoffe, die in Verstärkerfolien Verwendung finden, mit zunehmender Strahlenhärte empfindlicher werden. D.h. trotz abnehmender Röntgenstrahlenabsorption (Abb. 48) steigt die Lichtausbeute.

Nach Angaben in der Literatur (19, 24) nimmt für Gadolinium-haltige Folien diese Empfindlichkeit mit wachsender kV-Zahl stärker zu als bei CaWO_4 , für Lanthan-haltige Folien dagegen weniger stark. In der vorliegenden Untersuchung konnte dieses Ergebnis im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht bestätigt werden.

Es steht jedoch fest, daß jeder Leuchtstoff die Röntgenstrahlung unterschiedlich absorbiert. In Abb. 48 ist die Absorption verschiedener Leuchtstoffe in Abhängigkeit von der Energie der auftreffenden Röntgenquanten dargestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Lage der K-Absorptionskanten weisen die SE-Leuchtstoffe ein zum CaWO_4 unterschiedliches Absorptionsverhalten auf (10, 15, 17).

zu 2. : Liegt die Quantenenergie in Filmebene in einem Bereich, in dem die Leuchtstoffe unterschiedlich stark absorbieren, so könnte dies zu unterschiedlichem Schwärzungsverhalten führen. Dieser Bereich liegt bei Quantenenergien von 35 - 70 keV (Abb. 48). Daß diese Energieniveaus auch bei Verwendung hoher Aufnahmespannungen auftreten, hat mehrere Gründe:

- Beim Einschalten der Röntgenröhre wird erst nach ca. 2 - 3 ms die Quantenenergie erreicht, die der einge-

stellten Röhrenspannung entspricht, dieselbe Zeit vergeht nach dem Ausschalten der Röhre bis zum Ende der Quantenemission. Dies hat bei kurzen Belichtungszeiten unter 10 mAs (die besonders bei SE-Kombinationen auftreten) zur Folge, daß die über die gesamte Schaltzeit gemittelte Quantenenergie niedriger ist als die der eingestellten Röhrenspannung entsprechende. Dies wurde bei Messungen des Dosisleistungsverlaufs festgestellt (56).

- Nur wenige Quanten erreichen die mit der eingestellten Röhrenspannung mögliche höchste Energiestufe, die Mehrzahl der Quanten liegt unter diesem Energieniveau (siehe auch Kap. 2.1.2.1.2.).
- Die mittlere Quantenenergie hinter dem Aufnahmeobjekt ist immer geringer als vor dem Durchtritt durchs Objekt (siehe auch Kap. 2.1.2.2.).
- Mit Zunahme von Dicke und Dichte des Aufnahmeobjekts steigt die mittlere Energie der Quanten hinter dem Objekt. Nach Birch und Mitarb. (8) beträgt die mittlere Photonenenergie bei einer Röhrenspannung von 100 kV (2,5 mm Al-Filterung) hinter 10 cm Gewebe 54,9 keV, hinter 18,5 cm Gewebe + 1,5 cm Knochen dagegen 66,2 keV, was einer Aufhärtung um ca. 20 % entspricht.

Alle genannten Faktoren führen dazu, daß die mittlere Quantenenergie in Filmebene auch bei höheren Röhrenspannungen in einem Bereich liegt, der der Lage der K-Absorptionskanten der Leuchtstoffe entspricht (Abb. 8 und 48).

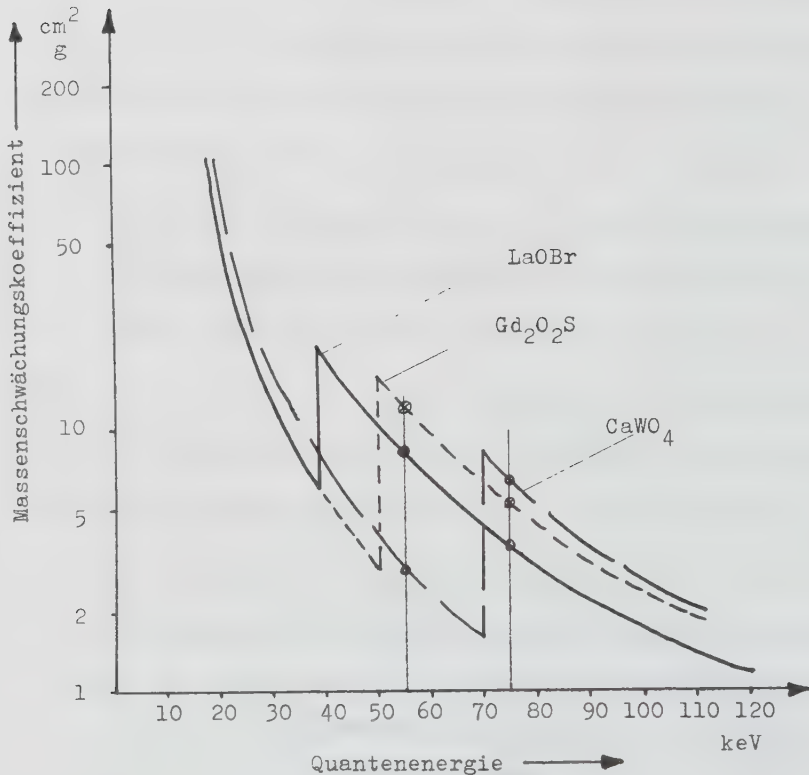


Abb. 48 Massenschwächungskoeffizient als Maß für die Röntgenstrahlen-Absorption in Abhängigkeit von der Quantenenergie für die Leuchtstoffe LaOBr, Gd₂O₂S und CaWO₄ (modifiziert nach Degenhardt und Mitarb. (15))

Zwischen 37,4 keV und 69,5 keV Quantenenergie absorbiert das LaOBr mehr Strahlung als das CaWO₄, für Gd₂O₂S gilt das in einem Bereich zwischen 50,2 und 69,5 keV.

Außerhalb der genannten Bereiche absorbiert das CaWO₄ stärker als die beiden SE-Leuchtstoffe.

Berücksichtigt man die Ergebnisse von Birch und Mitarb. (8), so wird deutlich, daß z. B. bei Wirbelsäulenaufnahmen zwischen SE-Leuchtstoffen und CaWO_4 Absorptionsunterschiede auftreten können:

Unter der Annahme, daß hinter der Wirbelsäule eine stark aufgehärtete Strahlung von beispielsweise 75 keV mittlerer Energie auftritt, während im Bereich des übrigen Thorax die mittlere Energie 55 keV betragen möge (zur Veranschaulichung sind diese beiden Energieniveaus in Abb. 48 gekennzeichnet), wird deutlich, wie unterschiedlich die Absorption zwischen CaWO_4 und SE-Leuchtstoffen sein kann: Die SE-Leuchtstoffe LaOBr und $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ weisen im Thoraxbereich eine wesentlich stärkere Absorption auf als hinter der Wirbelsäule, während das CaWO_4 hinter der Wirbelsäule stärker absorbierend wirkt als im übrigen Thoraxbereich. Da jedoch die Strahlenenergiemenge hinter der Wirbelsäule geringer ist als im restlichen Thoraxbereich, wirkt sich die unterschiedliche Absorption beim CaWO_4 kontrastausgleichend aus, während sie im Falle der SE-Leuchtstoffe zu einer Kontrastverstärkung führt.

Das Beispiel zeigt, welche Bedeutung der Aufhärtung der Strahlung, z.B. hervorgerufen durch skoliotische und kyphotische Veränderungen, in Bezug auf die Absorption der Strahlung zukommen kann.

Obwohl nach Kraft und Mitarb. (29) die unterschiedliche Strahlenabsorption bei verschiedenen Quantenenergien kein direktes Maß für die Lichtausbeute der Folien darstellt, könnte die unterschiedliche Absorption dennoch für das in der Praxis beobachtete unterschiedliche Kontrastverhalten der SE-Kombinationen mitverantwortlich sein.

4.10. Versuch der Messung des Rauschens mit Hilfe eines objektiven Verfahrens

In der Literatur wird der Begriff "Signal-Rausch-Verhältnis" verwendet (28, 48, 64). Die genannten Autoren verstehen unter diesem Begriff, daß sich ein Detail im Bild ausreichend von seiner Umgebung abheben muß, um vom Betrachter erkannt werden zu können. Das Detail muß sich dabei in Größe, Kontrast und Schärfe in bestimmter Art und Weise aus dem - in jedem Bild vorhandenen - statistischen Rauschen abheben.

Um ein solches Verhältnis zahlenmäßig angeben zu können, ist es erforderlich, ein Maß für das Rauschen in einem Abbildungssystem zu finden, was bisher nicht befriedigend gelungen ist.

4.10.1. Theoretische Überlegungen

Ein Maß für das Rauschen müßte das ständige Wechseln von Amplitude und Frequenz der Schwärzungsschwankungen, die ja das Rauschen ausmachen, berücksichtigen.

Da das Rauschen ein statistisches Phänomen ist, hat man versucht, mit komplizierten Rechengvorgängen wie z.B. der Fourieranalyse sowohl die Amplitudenänderung als auch die Frequenzänderung zu beschreiben (1, 63).

In der vorliegenden Untersuchung sollte ein weniger aufwendiges Verfahren benutzt werden, das sich der Standardabweichung einer Mikrodensitometrie-Kurve von einer Grund-

linie bedient. Dieses Verfahren ist auch als Selwyn'sche Körnigkeitsmessung in der Literatur beschrieben (20, 21, 51). Es berücksichtigt nur die Schwankungen der Amplitude der Mikrodensitogramme und nicht deren Frequenzänderung.

Variable Größe bei den Untersuchungen mit dem Mikrodensitometer ist die Abmessung des Meßspalts dieses Gerätes.

Die Selwyn'sche Körnigkeit ist durch die Beziehung

$\sigma_F^2 \times F = \text{const.}$ definiert. Dies bedeutet, daß das Produkt aus der Varianz eines Mikrodensitogramms und der Meßfläche des Mikrodensitometers, mit dem diese Kurve aufgezeichnet wurde, konstant sein soll.

Bei den Messungen mit unterschiedlicher Spaltgröße des Mikrodensitometers haben wir feststellen können, daß die Selwyn'sche Körnigkeitsbeziehung erst ab einer Spaltgröße von $0,4 \text{ mm}^2$ erfüllt wird.

4.10.2. Praktische Durchführung der Messungen

Bei der praktischen Gewinnung der Mikrodensitogramme von einer homogen belichteten Filmstelle ergab sich das Problem, daß sich der Lichtstrahl des Mikrodensitometers nicht gleichzeitig auf beide photographischen Schichten des Röntgenfilms, die wie beschrieben ca. $200 \mu\text{m}$ durch den Filmträger voneinander getrennt sind, fokussieren ließ.

Dieses Problem wird auch in der Literatur angesprochen (7, 20).

Da uns der von Friedrich und Mitarb. (20) vorgeschlagene Weg, nämlich jeweils eine Emulsionsschicht zu entfernen und

nur eine Schicht zu messen, als nicht geeignet erschien, da auch der klinisch tätige Radiologe nicht eine Seite des Filmträgers von der Emulsion freischabt, fokussierten wir den Mikrodensitometer-Lichtstrahl auf die Mitte zwischen den beiden geschwärzten Schichten, d.h. auf die Mitte des Filmquerschnitts.

Als Fehlerquelle kam bei der praktischen Durchführung der Messungen die Eingabe der Mikrodensitogramme in den Rechner in Betracht. Diese erfolgte durch manuelles Abtasten der Kurven auf einem elektronischen x-y-Koordinaten-Erfassungstisch. Es zeigte sich jedoch bei mehrmaliger Eingabe ein und desselben Mikrodensitogramms, daß sich die vom Rechner ermittelte Standardabweichung lediglich im Bereich von wenigen μm änderte, was auf die Messungen keine negativen Auswirkungen hatte.

Bei der Durchführung der Untersuchungen stellten wir fest, daß sich die Standardabweichung im Mikrodensitogramm mit der mittleren Schwärzung des Films ändert. Bei mittleren Schwärzungswerten von $S = 0$ bis $S = 0,9$ stieg die Standardabweichung mit zunehmender Schwärzung an. Im Bereich zwischen $S = 0,9$ und $S = 2,2$ blieb sie dagegen für die einzelnen Film-Folien-Kombinationen näherungsweise konstant. Sollte die Standardabweichung ein Maß für das Rauschen sein, so nimmt dieses bis zu einem mittleren Schwärzungswert von $S = 0,9$ zu, während es im Bereich von $S = 0,9$ bis $S = 2,2$ konstant bleibt.

4.10.3. Ergebnisse dieser Messungen

Die Schwärzungsschwankungen, die das Rauschen ausmachen, haben einen negativen Einfluß auf die Detailerkennbarkeit. Deshalb werden Röntgenaufnahmen, die nur geringe Schwankungen dieser Art aufweisen, als gut beurteilt (35). Da die mittlere Standardabweichung, die Gegenstand dieser Untersuchung war, ein Maß für die durchschnittliche Höhe dieser Schwärzungsschwankungen ist, darf angenommen werden, daß die Bildqualität, die mit einem Film-Folien-System zu erreichen ist, umso größer wird, je kleiner die ermittelte Standardabweichung ist.

Dies läßt sich am Beispiel der SE-Folien der Fa. CAWO zeigen, bei denen die Standardabweichung mit zunehmendem Auflösungsvermögen abnimmt (siehe Abb. 45).

Wir konnten jedoch keine Erklärung dafür finden, warum Film-Folien-Kombinationen mit hohem Auflösungsvermögen teilweise ein höheres Rauschen aufwiesen als Film-Folien-Kombinationen mit vergleichsweise geringem Auflösungsvermögen.

Eine einfach erkennbare Beziehung zwischen dem Rauschen, der verwendeten Röhrenspannung und dem FFA war nicht festzustellen. Daß auch bei hoher Röhrenspannung und kurzer Belichtungszeit ein eindeutiger Anstieg des Rauschens nicht auftrat, läßt den Schluß zu, daß die Aufnahmen entweder kein Quantenrauschen aufwiesen, oder aber das mit diesem Verfahren gemessene Rauschen von Spannungsänderungen unbeeinflußt bleibt.

Da es sich bei dem von uns gemessenen Rauschen offensichtlich um eine spannungsunabhängige Materialkonstante der Film-Folien-Kombinationen handelt, wurden die bei verschiedenen Aufnahmespannungen und unterschiedlichem FFA gewonnenen Rausch-Werte zu einem Wert zusammengefaßt und dem mAs-Bedarf, der dem Dosisbedarf entspricht, gegenübergestellt (siehe Abb. 46):

Nach Herstellern getrennt betrachtet, gilt:

Je höher der Dosisbedarf einer Film-Folien-Kombination, umso geringer ist das gemessene Rauschen. Der absolute Wert des Rauschens ist dabei von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das von uns gemessene Rauschen nicht in einem eindeutig gerichteten Verhältnis zum Auflösungsvermögen und zum Dosisbedarf steht, obwohl einzelne Film-Folien-Fabrikate die Existenz einer solchen Beziehung vermuten lassen.

Wie bei allen objektiven Vergleichsverfahren für Abbildungssysteme besteht auch bei dieser Untersuchung die Schwierigkeit, die vergleichbaren und reproduzierbaren Ergebnisse auf einen Nenner zu bringen mit den subjektiven Parametern der Bildgütebeurteilung des einzelnen Radiologen (35).

Für den einzelnen Radiologen mag beispielsweise eine Kombination, die nach dieser Untersuchung eine hohe Standardabweichung aufweist, besser zur Diagnosestellung geeignet sein als eine Kombination, für die wir eine niedrige Standardabweichung ermittelten, während für den nächsten Radiologen genau das Gegenteil gilt.

Auch die Frage, ob das Außerachtlassen der Frequenzänderungen im Mikrodensitogramm zu einem Verlust wesentlicher Anteile des Rauschens bei den Messungen geführt hat, läßt sich ohne weitere Untersuchungen nicht sicher beantworten.

5. Zusammenfassung:

In der vorliegenden Arbeit wurden physikalisch-aufnahmetechnische Eigenschaften von Röntgenfilmen und Verstärkerfolien beschrieben und miteinander verglichen.

Da eine getrennte Betrachtung der Eigenschaften von Filmen und Folien von begrenzter Aussagekraft für den Radiologen ist, wurden die Filme und Folien zu 20 Kombinationen zusammengefaßt.

Der Untersuchung vorangestellt wurde die Beschreibung der für die Bilderzeugung mit Film-Folien-Systemen wesentlichen Aufnahmeparameter und ihr Einfluß auf die Bildqualität. Da den Verstärkerfolien in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zukommt, wurden die verschiedenen Eigenschaften der einzelnen Bestandteile der Folien und ihre Auswirkungen auf das Röntgenbild besonders ausführlich dargestellt. Chemische und physikalisch-chemische Meßgrößen wurden dabei aus der Literatur übernommen. Es wurden ferner verschiedene Möglichkeiten des Vergleichs von Abbildungssystemen beschrieben.

Die Untersuchung der Film-Folien-Kombinationen erfolgte unter praxisnahen Bedingungen mit Geräten, die im täglichen Routinebetrieb einer Klinik benützt werden.

Dabei erwies sich das als Aufnahmeobjekt verwendete Prüfphantom der Deutschen Röntgen-Gesellschaft - obgleich es nicht für vergleichende Untersuchungen an Film-Folien-Kombinationen konstruiert worden ist - vor allem in der praktischen Handhabung als einsetztauglich.

An Verstärkerfolien standen sowohl herkömmliche CaWO_4 -Folien als auch blau- bzw. grün-leuchtende SE-Folien zur Verfügung. Sie wurden jeweils mit einem auf ihre Farbemission spektral abgestimmten Film kombiniert.

Die während der Aufnahmen gewonnenen Meßwerte des mAs-Produkts, der Eintrittsdosis und des Flächendosisprodukts wiesen folgendes Verhalten auf:

Mit steigender Aufnahmespannung fielen die angegebenen Meßwerte für alle untersuchten Film-Folien-Kombinationen im untersuchten Bereich von 57 kV bis 117 kV Röhrenspannung.

Eine Gegenüberstellung der Belichtungsdaten von CaWO_4 - und SE-Kombinationen vergleichbaren Auflösungsvermögens ergab für die SE-Kombinationen eine Minderung der Strahlenbelastung um bis zu 45 % gegenüber den herkömmlichen CaWO_4 -Folien. Die gefundene Abnahme der Strahlenbelastung für den Patienten und das untersuchende Personal liegt damit im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte.

Bezüglich der Bildqualität ist festzustellen, daß das Auflösungsvermögen der CaWO_4 -Kombinationen von den SE-Kombinationen bei geringerem Dosisbedarf erreicht wurde.

Hinsichtlich des Kontrastverhaltens und des Spannungsgangs wiesen die SE-Kombinationen im Rahmen der Meßgenauigkeit kein wesentlich unterschiedliches Verhalten zu den CaWO_4 -Kombinationen auf.

Ein in der Praxis auftretendes, abweichendes Kontrastverhalten der SE-Kombinationen ist unter Umständen auf die unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlung durch die SE-Leuchtstoffe in Abhängigkeit von der Quantenenergie zurückzuführen. Die von den Herstellern gegebenen Anwendungshinweise betreffend die Aufnahmespannung dürfen daher keinesfalls außer acht gelassen werden. Jedoch bleibt auch weiterhin die Untersuchung von Objekten mit sehr inhomogener Dichte auf Grund der in Bildebene auftretenden großen Quantenenergie-Unterschiede problematisch.

Zur Untersuchung des Rauschens der Film-Folien-Kombinationen wurde als objektives Verfahren die Standardabweichung im Mikrodensitogramm einer homogen geschwärzten Fläche verwendet, die als Selwyn-Granularity in der Literatur beschrieben ist (51).

Das auf diese Weise gemessene Rauschen zeigt - betrachtet man die Folien-Kombinationen jedes Herstellers für sich als Gruppe - mit Abnahme des mAs -Bedarfs eine ansteigende Tendenz und umgekehrt. Die einzelnen Gruppen unterscheiden sich jedoch im absoluten Maß des Rauschens, wobei die SE-Folien-Kombinationen der Fa. CAWO das geringste Rauschen aufwiesen.

Eine einfach erkennbare Beziehung zwischen dem gemessenen Rauschen und dem Auflösungsvermögen war für CaWO_4 - und

grün-leuchtende SE-Kombinationen nicht nachzuweisen. Für die blau-leuchtenden SE-Folien-Kombinationen der Fa. CAWO ergab sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Auflösungsvermögen, Rauschen und mAs-Bedarf in der Weise, daß das Auflösungsvermögen den Erwartungen entsprechend mit zunehmendem Rauschen geringer wurde, was jedoch auch mit einem abnehmenden mAs-Bedarf verbunden war. Die untersuchten, ebenfalls blau-leuchtenden SE-Kombinationen der Fa. Siemens zeigten gleichfalls ein mit abnehmendem Rauschen ansteigendes Auflösungsvermögen.

Auf Grund der Tatsache, daß von uns kein für alle untersuchten Kombinationen universell gültiger Zusammenhang zwischen Auflösungsvermögen und Rauschen festgestellt werden konnte, erscheinen weitere Untersuchungen diesbezüglich als erforderlich.

Ein Einfluß der Röhrenspannung in Form des Quantenrauschens konnte bei den Messungen der Standardabweichung nicht nachgewiesen werden. Auch für hochverstärkende SE-Kombinationen zeigte das Rauschen mit zunehmender Röhrenspannung keinen gerichteten Anstieg.

Die Meßergebnisse der vorliegenden Untersuchung sprechen dafür, daß die SE-Kombinationen wegen der erheblichen Strahlendosisreduzierung bei vergleichbarer Bildqualität unter Beachtung der Anwendungsvorschriften der Hersteller in der Diagnostik verwendet werden sollten.

Abzuwarten bleibt, ob die SE-Folien eine unterschiedliche Haltbarkeit und Alterung im Vergleich zu den herkömmlichen Kalziumwolframat-Folien aufweisen. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegen darüber keine gesicherten Erkenntnisse vor, jedoch auch keine nachteiligen Berichte.

Literaturverzeichnis

1. Angerstein, W.: Lexikon der radiologischen Technik in der Medizin. Verlag Georg Thieme, Leipzig 1975
2. Angerstein, W., Gursky, S.: Grundlagen der Strahlenphysik und radiologischen Technik in der Medizin. Verlag Georg Thieme, Leipzig 1975
3. Angerstein, W., Plapperer, H.: Über Röntgenverstärkerfolien: Bildgüte und Dosisbedarf bei Röntgenaufnahmen in Abhängigkeit von der Größe der Leuchtstoffkristalle. Röntgenpraxis Jahrgang XVIII, Heft 1
4. Arnal, M.-L., Pychlau, H.: Die Strahlenbelastung des Patienten bei röntgendiagnostischen Untersuchungen. Ärztliche Forschung XVI. Jahrgang, Heft 5
5. Arnold, B.A., Eisenberg, H., Bjärngard, B.E.: The LSF and MTF of Rare-Earth Oxisulfide Intensifying Screens. Radiology 121, 473-477, Nov. 1976
6. Arnold, B.A., Eisenberg, H., Bjärngard, B.E.: Measurements of Reciprocity Law Failure in Green-Sensitive X-Ray Films. Radiology 126, 493-498, Feb. 1978
7. Biedermann, K., Frieser, H.: Die Photometrie des Röntgenfilms. Röntgen-Blätter, 20. Jahrgang, 3/67
8. Birch, Marshall, Ardran: The Hospital Physicists' Association: Catalogue of Spectral Data for Diagnostic X-Rays. Scientific Report Series - 30/1979
9. Bösche, H.: Der Einfluß verschiedener Folienkombinationen auf Belichtungszeit und Strahlenbelastung des Patienten bei 60 bis 200 kV. Röfo 98,1

10. Buchanan, R.A., Finkelstein, S.I., Wickersheim, K.A.:
X-Ray Exposure Reduction Using Rare-Earth Oxysulfide
Intensifying Screens. Radiology 105, 185-190, Oct. 1972
11. Buchmann, F.: Format und Bildinhalt.
Röntgen-Blätter 31(1978), 90-92
12. Degenhardt, H.: Zur Verwendung von Seltene-Erden-
Leuchtstoffen in feinzeichnenden Verstärkerfolien.
Electromedica 3/80
13. Degenhardt, H.: Filmuniverselle Verstärkerfolien mit
Zweibandenleuchtstoff Titan 2. Electromedica 3/81
14. Degenhardt, H.: Die historische Entwicklung der Leucht-
substanzen und deren Anwendungen in der Röntgentechnik.
Electromedica 51(1983) Heft 4
15. Degenhardt, H., Kuhn, H., Pfeiler, M.:
Dosisersparung und Abbildungsgüte bei Film-Folien-
Systemen. Röntgenpraxis, Jahrgang 28(1975) Heft 11
16. Eddleston, B., Moores, B.M., Walker, A.:
Eye Dose Measurements Using Conventional and Rare-Earth-
Screens During Tomography of the Para-Nasal Sinuses.
British Journal of Radiology (1977) 50, 266-270
17. Freyschmidt, J.: Zu modernen Film-Folien-Systemen
aus seltenen Erden in der klinischen Radiologie.
Röntgenpraxis, Jahrgang 34(1981) 227-233
18. Freyschmidt, J., Saure, D.: Neue Verstärkerfolien
in der Kinderradiologie. Röntgen-Blätter 29(1976)
299-306
19. Freyschmidt, J., Saure, D., Hagemann, G.: Neue
Verstärkerfolien in der klinischen Radiologie.
Röfo 125, 3(1976) 279-284

20. Friedrich, M., Weskamp, P.: Bildgütefaktoren bei der Filmmammographie Teil I.
Röfo 125, 3(1976) 269-279
21. Friedrich, M., Weskamp, P.: Bildgütefaktoren bei der Filmmammographie Teil II.
Röfo 125, 5(1976) 461-471
22. Frommhold, W.: Verstärkerfolie und Bildgüte-Untersuchungen an deutschen Folienfabrikaten.
Röfo 84, 6
23. Haendle, J., Wolf, H.D.: Bildqualitätsanalyse von Röntgensystemen mit Hilfe der ROC (- Receiver Operating Characteristic)- Methode. Röntgenpraxis, Jahrgang 33 (1980) Heft 8
24. Hagemann, G., Töllner, D., Saure, D., Freyschmidt, J.: Neue Verstärkerfolien in der klinischen Radiologie.
Röfo 124, 5(1976) 483-489
25. Haschka, H.: Persönliche Mitteilung vom 20.04.1982
Fa. Agfa-Gevaert, Schrobenhausen
26. Hoxter, E.A.: Einführung in die Röntgenaufnahmetechnik.
Siemens AG 1975
27. Jaeger, H.: Physikalisch-Technische Grundlagen zur röntgenphotographischen Abbildung von Weichteilen.
Röntgen-Blätter, 22. Jahrgang, 7/69
28. Knedel, H., Weberling, R., Hagemann, G.: Signal-Rausch-Verhältnis, Auflösung und Dosisbedarf zum Qualitätsvergleich neuer Verstärkerfolien in der klinischen Radiologie. Röntgenpraxis 34, 168-175 (1981)

29. Kraft, A., Nahrstedt, U., Widenmann, L.:
Untersuchungen an neuartigen Verstärkerfolien für
die Röntgendiagnostik.
Röntgenpraxis Jahrgang 28(1975) Heft 11
30. Krestel, E.: Bildgebende Systeme für die
medizinische Diagnostik. Siemens AG 1980
31. Kühl, W.: Bildformate, Physikalisch-technische
Aspekte der Röntgenbilderzeugung.
Röntgen-Blätter 31(1978) 85-89
32. Kütterer, G., Lang, G., Panzer, W., Schätzl, M.,
Schott, O.: Ein Testphantom zur Kontrolle
physikalischer Parameter bei Röntgengdirektaufnahmen.
Röntgenpraxis Jahrgang 31(1978) Heft 2
33. Kuhn, H.: Die Bedeutung der Bleieinlagen gegen
Rückstreuung in Röntgenkassetten für die
Bildqualität. Röntgen-Blätter, 23. Jahrgang, 3/1970
34. Kuhn, H.: Die Methode der ROC-Kurven und ihre
Anwendung in der Röntgendiagnostik.
Röntgenpraxis Jahrgang 33(1980) Heft 5
35. Lissner, J.A.: Einfluß von Röntgenröhre, Film und
Folie auf die Bildqualität.
Röntgenpraxis Jahrgang 22, Heft 1
36. Lissner, J.: Schwankungen des Informationsgehaltes
bei unterschiedlicher Technik von Röntgenunter-
suchungen bei Thoraxaufnahmen.
Röntgen-Ber. Bd. 1.2 125-134
37. Lissner, J., Hug, O.: Radiologie - Kompendium für
den ersten klinischen Studienabschnitt.
Ferd. Enke Verlag Stuttgart 1975

38. Lissner, J.: Methodisches Vorgehen bei der Röntgendiagnostik der Colitis.
Radiologe 16(1976) 450-454
39. Lissner, J., Schätzl, M.: Ärztliche Überlegungen bei der Einführung einer Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik.
Röntgen-Blätter 30(1977) 591-597
40. Lissner, J.: Technische Faktoren, Qualitätssicherung, ärztliche Aussagen. Röntgen-Blätter 32(1979) 581-590
41. Lissner, J.: Radiologie II , Lehrbuch für den 2. Abschnitt der ärztlichen Prüfung.
Ferd. Enke Verlag Stuttgart 1979
42. Maurer, H.-J.: Bildformat und Dosis
Röntgen-Blätter 31(1978) 93-104
43. Maurer, H.-J.: Standortbestimmung in der Röntgen-diagnostik - Einführende Betrachtung.
Röntgen-Blätter 31(1978) 55-56
44. Meiler, J.: Die Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von Brennfleck, Verstärkerfolie und Abbildungsmaßstab bei der Aufnahme von unbewegten Objekten.
Röntgen-Blätter 20. Jahrgang 12/67
45. Meiler, J.: Die Zusammensetzung der verschiedenen Unschärfefaktoren zur Gesamtunschärfe im Röntgenbild.
Röfo 82, 1
46. Meiler, J.: Einfluß der Brennfleckgröße und der Verstärkerfolie auf die Bildgüte einer Röntgenaufnahme. Röfo 82, 1

47. Meiler, J.: Die Modulationsübertragungsfunktion des Röntgenbildes.
Fortschr. Röntgenstr. 125, 6(1976) 559-563
48. Meiler, J.: Die Begrenzung der Detailerkennbarkeit im Röntgenbild durch den Schwellenkontrast.
Fortschr. Röntgenstr. 127, 2(1977) 179-182
49. Newlin, N.: Reduction in Radiation Exposure: The Rare Earth Screen. Am. J. Roentgenol.
130: 1195-1196, 6/1978
50. Pfeiler, M., Theil, G.: Die Übertragungsfunktion in der Radiologie- Ein kleines Bildkompendium.
Röntgenpraxis Jahrgang 28(1975) Heft 9
51. Rao, G., Fatouros, P.P., James, A.E.:
Physical Characteristics of Modern Radiographic Screen-Film-Systems. Investigative Radiology
Sept-Oct. 1978
52. Reichmann, S., Astrand, K., Kunz, G.:
Testing of Roentgen Film Quality.
Acta Radiologica Diagnosis 19(1978) Fasc. 1
53. Reichmann, S., Strid, K.-G.: Diagnostically Acceptable Level of Secondary Radiation.
Acta Radiologica Diagnosis 20(1979) Fasc. 1A
54. Richter, K., Angerstein, W., Steinhart, L.:
Röntgenbildverstärkerphotographie.
Verlag Georg Thieme Leipzig 1980
55. Rossi, R.P., Hendee, W.R., Ahrens, C.R.:
An Evaluation of Rare Earth Screen / Film Combinations.
Radiology 121: 465-471, Nov. 1976

56. Schätzl, M.: Persönliche Mitteilung vom 11.04.1984
57. Selin, K., Reichmann, S.: High-Density Failure of Radiographic Films.
Acta Radiologica Diagnosis 18(1977) Fasc. 1
58. Soila, P., Edgren, J., Landtman, M., Laasonen, L.: Technical Notes: Test of Rare Earth Oxisulfide Intensifying Screens. British Journal of Radiology 50(1977) 205-207
59. Stevels, A.L.N.: New Phosphors for X-Ray Screens. Philips Research Laboratories, Eindhoven
60. Venema, H.W.: X-Ray Absorption, Speed, and Luminescent Efficiency of Rare Earth and other Intensifying Screens. Radiology 130: 765-771, March 1979
61. Vogel, H., Löhr, H., Haug, P., Schütt, B.: Strahlenbelastung von Patienten und strahlenexponiertem Personal bei urologischen Röntgenuntersuchungen. Röntgen-Blätter 30(1977) 39-50
62. Vyborny, C.J., Metz, C.E., Doi, K., Rossmann, K.: Screen/Film System Speed: Its Dependence on X-Ray Energy. Radiology 125: 811-816, Dec. 1977
63. Wagner, R.F., Weaver, K.: Prospects for X-Ray Exposure Reduction Using Rare Earth Intensifying Screens. Radiology 118: 183-188, Jan. 1976
64. Weberling, R.: Untersuchungen von Film-Folien-Systemen auf der Basis "Seltener-Erd-Phosphore" als Bildempfänger für die Mammographie. Röntgen-Blätter 32(1979) 109-116
65. Widenmann, L., Kraft, A., Nahrstedt, U.: Untersuchungen an neuartigen Verstärkerfolien für die Röntgendiagnostik. Röntgenpraxis Jahrgang 28/1975 Heft 11

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. J. Lissner für die Ermöglichung der Bearbeitung dieses Themas an der Radiologischen Klinik und Poliklinik der Universität München danken.

In besonderem Maße bin ich Herrn Dr. R. Rienmüller für die theoretische und praktische Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchung zu Dank verpflichtet. Herr Dr. Rienmüller übernahm freundlicherweise die Belichtung der Phantomaufnahmen und einen Großteil der Literatursammlung.

Herrn Dr. Rienmüller und Herrn Dipl.-Phys. M. Schätzl danke ich für die fruchtbaren Gespräche und Anregungen zum Thema. Herr Schätzl zeigte dabei große Ausdauer, mich theoretisch und praktisch in das Arbeitsgebiet der Mikrodensitometrie einzuführen, wofür ihm mein Dank zukommt.

Für die Erstellung des Rechnerprogramms zur Auswertung der Mikrodensitogramme und die Einweisung am Rechner danke ich Herrn Dipl.-Phys. H. Polke (Institut und Poliklinik für Arbeitsmedizin der Universität München, Dir.: Prof. Dr. G. Fruhmann).

LEBENS LAUF

Am 28. Juni 1956 wurde ich, Rudolf Lorenz, als erstes Kind der Eheleute Rudolf und Wilhelmine Lorenz, geb. Wilfer, in München geboren.

Von 1963 bis 1966 besuchte ich die Volksschule in München-Allach. Anschließend trat ich an das mathematisch-naturwissenschaftliche Max-Planck-Gymnasium in München-Pasing über, wo ich 1975 mit der Reifeprüfung abschloß.

Im Sommersemester 1976 nahm ich an der Ludwig-Maximilians-Universität München das Studium der Zahnheilkunde auf. Nach bestandener zahnärztlicher Prüfung erhielt ich am 21. Juli 1981 meine Bestallung als Zahnarzt.

Von Oktober 1981 bis Dezember 1982 leistete ich meinen Grundwehrdienst als Sanitätsoffizier/Zahnarzt in Mittenwald.

Ab dem 01. Januar 1983 arbeitete ich ein Jahr lang als angestellter Assistenzzahnarzt in der Praxis von Herrn Dr. J. Wirmharter in Aichach.

Seit Januar 1984 leite ich eine eigene Zahnarztpraxis in München.

